ATOMOΣ 日本原子力学会誌 2012.4

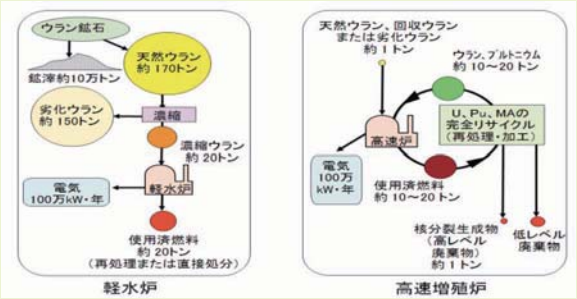
巻頭言

1 転換期における科学の役割 大西 隆

特別企画 我が国の核燃料サイクル

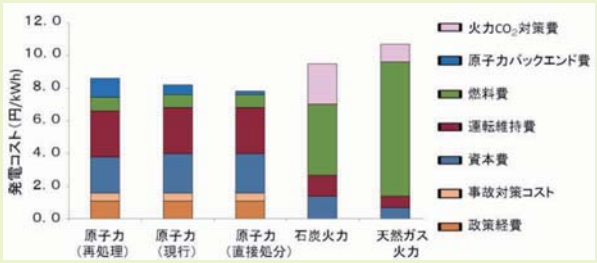
12 核燃料サイクルについての正しい理解を 田中 知

13 日本の核燃料サイクル—その意味と歴史的重み
高速増殖炉サイクルは新たな燃料調達を不要とし，「技術力を資源とする恒久的巨大電力生産システム」であり，化石燃料枯渇時代の救世主となりうる。 河田東海夫



軽水炉と高速増殖炉の比較

21 今後の核燃料サイクルについて—コスト等から見た核燃料サイクル
0.4円/kWh程度の負担でMOXリサイクル方式を続けることにより，天然ウラン価格の高騰の時代に速やかに高速増殖炉に移行できるような技術や制度の基盤を固めておくべきだ。 山名 元



原子力発電コストと火力発電コスト

会長所信

前付 東京電力福島第一発電所事故から1年が経過して 田中 知

時論

2 わが国におけるエネルギー政策について
あらゆるデータや知見を国民に提示した上で，最適解をめざした議論を望む。 内田 厚

4 原発事故後の科学技術と社会との関係
科学は「確率」を示すことはできても，社会的な「判断」を下すことはできない。 藤垣裕子

解説

28 津波対策評価ガイドラインの策定—福島第一原子力発電所の事故後の対策を受けて
保全学会の「津波対策評価ガイドライン検討会」は，国内の原子力発電所が津波に対してどの程度の対応力を備えているかを評価するためのガイドラインを策定し，安全性を評価した。 橋爪秀利

33 福島第一原子力発電所の事故に係る放射線影響分科会の活動報告(Ⅱ)—緊急事態宣言下初期における放射線情報の把握と活用
放射線影響分科会は福島事故後，放射性物質の放出率や拡散状況の評価，環境中の放射性物質及び放射線情報の収集，分析，評価，緊急時下の放射線測定の課題や住民および防災関係者の被ばく管理に関する提言などの活動を行ってきた。
「原子力安全」調査専門委員会 放射線影響分科会

43 福島第一原子力発電所事故後の天然ガス及び化石燃料の利用動向—第1回 化石燃料の利用動向
化石燃料は火力発電以外にも多くの利用先があり，これらの動向は発電用燃料としての見通しに大きく影響する。その将来動向について解説する。 塙 雅一，小野崎正樹

表紙の絵(洋画) 「牛窓 瀬戸の春」 製作者 坂手得二

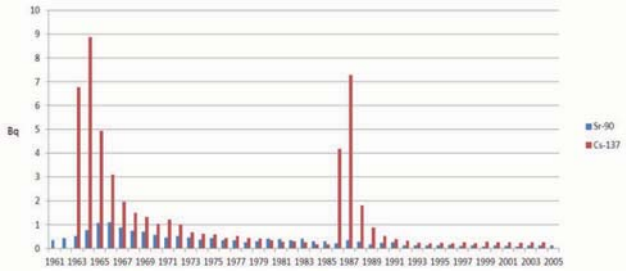
【製作者より】「日本のエーゲ海だ」と，かってギリシアの高官がここ牛窓の瀬戸内海を絶賛した。岡山県東部にあって古代から寄港地として栄えてきた。背後には標高167 mの丘に広がるオリーブ園，囲む雑木林，温暖な気候に恵まれた豊かな自然と共生してきた。この丘から望むコバルトブルーに輝く灘の魅力と瀬戸内の深遠な曼陀羅宇宙を表現。

第43回「日展」へ出展された作品を掲載(表紙装丁は鈴木 新氏)

解説

37　ヨーロッパにおける食品摂取経路を通じてのチェルノブイリ事故の影響―全身計測による放射性セシウムの人体負荷量とそれによる内部被ばく

放射性物質による環境汚染に関して，私たちは大気圏内での核兵器実験とチェルノブイリ原子力発電所事故という2度の経験をもっている。　稲葉次郎



ドイツにおける食品からのCs-137摂取量
（1日一人あたりの摂取量 Bq）

48　今，教育現場に必要なもの

私たちは放射線への理解を深めるために，壁新聞や教材開発を通して，啓蒙活動を実施してきた。その実践のようすを紹介する。塚平恒雄

談話室

53　日米欧原子力学生国際交流事業による米国留学生受け入れ：平成23年度の報告と今後の展望　宇根﨑博信

ANGLE

視角

55　理想と現実の調和　野村茂雄

56　我が国の実情に即した今後の電源の選択を　岡田英俊

57　原子力に思うこと　溝口　直

6　NEWS

●原子力規制庁が4月発足へ
●電事連，安全性向上で新組織
●原子力委，サイクルを選択肢ごとに評価
●10～20ミリSv地域から除染着手
●IAEA，「ストレステストは妥当」
●事故調，7月下旬に最終報告
●保安院，ERSSを自動監視体制に
●福島第二　1号機で高経年化評価
●東芝とIHI，可搬型の汚染水処理装置
●三菱重工，がん病巣を把握する追尾治療
●ヨルダンとの協力協定が発効
●カザフスタン原子力学会と協定を締結
●海外ニュース

福島第一原子力
発電所2号機
原子炉建屋5階
（2月，東京電力HP）

ジャーナリストの視点

59　「国際化」は死語になるか？　潮　昭太

日米欧学生交流

63　マインツ大学滞在記　能任琢真

32　From Editors
58　新刊紹介　「災害論―安全工学への疑問」　木村逸郎
60　「春の年会」「秋の大会」参加料改定のお知らせ
61　「2012年秋の大会」研究発表応募・参加事前登録のご案内
62　会報　原子力関係会議案内，共催行事，人事公募，英文誌無料閲覧開始のお知らせ，英文論文誌（Vol.49, No.4）目次，主要会務，編集後記，編集関係者一覧

学会誌ホームページはこちら
http : //www.aesj.or.jp/atomos/

会長所信

東京電力福島第一発電所事故から1年が経過して

日本原子力学会 会長 田中 知

東京電力福島第一原子力発電所事故から１年が経過しました。依然として多くの方が避難生活を余儀なくされているなど多大なご迷惑をおかけしていることに対して改めてお見舞いを申し上げます。昨年12月に，事故収束に向けた道筋において完全な冷温停止を目標としたステップ２の達成が報告され，いよいよ中長期的な廃止措置および環境回復に向けた活動が本格的に始動したところであります。

さて，事故直後から，日本原子力学会(以下，学会)は様々な活動を行って参りました。事故直後に「原子力安全」調査専門委員会を立ち上げ，それまで個々に行われていた情報収集やフィールドワークなどの活動を集約し，学会として整理・検討した情報を発信し提言活動等を行って参りました。専門委員会では，さらに分科会として，事故分析および原子力安全の課題抽出を行う技術分析分科会，放射線影響・環境影響について分析を行う放射線影響分科会，放射性物質による汚染除去および環境修復に関する課題抽出を行うクリーンアップ分科会を組織し，多角的な視点から検討を行っております。さらに，複数回のシンポジウムや学会の大会などにおいて，事故原因・遠因の分析，除染の状況や必要な課題の整理，そして様々な提言を行って参りました。また，福島県と共催で安全安心フォーラムを開催し，放射線影響や除染について地元の方々と対話を行い，多くの有意義な御要望を頂きました。

学会から提言させていただいた項目は，事故分析による原子力安全向上における課題，事故収束および環境修復に関する課題，原子力防災および被ばく管理に関する課題であります。このうち，事故分析による原子力安全上の工学的な課題については，短期的には対応が進められており，中期的にみても関連する安全審査指針等の検討が行われております。安全審査指針等の整備に関しては原子力安全の根幹ともいえる重要な項目であり，学会としても学会標準作成活動を通して検討を継続し，重ねて提言して参ります。一方，環境修復に関する課題については，短期的な対応はなされているものの，中長期を見据えた目標設定や推進体制に改善の余地があると考えております。今後，廃炉措置に向けた作業を進めるにあたり，新たに判明した原子炉内の状況を踏まえて，検討作業に反映されなければなりません。学会としても，提言内容を適宜見直しながら，関連機関の活動をフォローして参ります。

学会は学術的または技術的専門家集団として，先述したような活動の実行にあたって必要となる研究開発の重要性について強く訴えるところであります。今回の事故に起因する放射性物質の管理および除染，中長期的には取り出した燃料や除染により発生する放射性廃棄物の管理や原子炉の廃止措置など，技術的に乗り越えなければならない課題が数多く存在します。これらの課題を解決しながら環境回復への道筋をつけることは，今後も原子力エネルギーを平和的に利用する上で必要不可欠なことであります。

環境に大量の放射性物質を放出するという未曽有の事故から１年が経過しますが，地域の除染，復興，廃炉措置の速度は決して早いとは申せません，今後加速する必要があります。学会は，今後とも，関係者との情報交換や住民との対話等を通じて，専門家集団であるべき学会がなすべきことを十分に認識，自覚しつつ，事故収束・環境修復のための諸活動を積極的に展開すると同時に，原子力に関する情報として，技術的な課題と解決への道筋を随時公開，提言したいと考えています。同時に，原子力エネルギーについての正しい情報を発信し続ける必要があります。リスク社会における原子力の在り方を正確に判断する情報提示が重要と考えます。これらにより原子力エネルギーの特性を踏まえたエネルギーミックスの議論に貢献していきたいと考えております。

事故により，科学者，専門家は信頼を失ったという意見があります。１年経過した今，学会は本当の信頼を得て，社会に貢献するべく，より重要な段階に入ったと考えます。

（2012年２月23日記）

巻頭言

転換期における科学の役割

日本学術会議会長・東京大学教授
大西　隆（おおにし・たかし）
東京大学大学院博士課程修了。1995年から東京大学教授。2011年より日本学術会議会長を兼ねる。専門分野は国土計画，地域開発，都市開発。

１～２年前の話をしても，随分昔のことのように思える。誰かが，「災後」という表現を使っていた。昨年３月の東日本大震災を境に，それ以前を災前，以後を災後と呼んだのである。災後から見ると，災前は，実時間的にはわずかな過去であっても，意識の上ではひどく昔になってしまった。もちろんこの表現は，我々の親の世代が戦前・戦後と表現したことに似せたものである。戦後生まれの私は，戦前というと随分昔のように思ったものだが，社会への関心がでた小学校上級の頃を起点にしても，20年も遡れば，まだ日米開戦前だったのである。しかし，終戦を境に，日本の統治機構，憲法，教育が変わるとともに，戦争体制下の統制経済から，資本主義経済が急速に発展していったこともあって，日常生活もすっかり変わってしまった。このため，太平洋戦争が時代を画する出来事であったことは多くの人にとって疑いなく，当然のことのように，戦前，戦後という表現が常用されてきた。実は，被災地を除けば，災後の生活がそう大きく変わったわけではない。徴兵制や種々の統制下にあった戦時体制から，平和な日常性の下で戦後復興が進んでいった変化に比べれば，生活の変化という点で，災前・災後を実感できるのは被災者等，日本国民全体からすれば一部の人々に限られるかもしれない。しかし，少なくとも以下の二つの意味で，東日本大震災は時代を画する出来事になるように思う。その一つは，上昇・増加から下降・減少への変化が改めて刻印されたことである。戦後復興から高度成長，さらにその余韻に浸ってきた時代が終了し，人口減少が本格化して“誰もいなくなる日本”に向かって進んでいくがゆえに，如何に出生と死亡のバランスがとれた社会を形成していくかが問われている。もちろん，これからの時代には，GDP のような国全体の指標で規模を競うのではなく，一人当たり GDP や心の豊かさを指向することによって量から質，外形から内面への転換を図ることが求められよう。換言すれば，戦後60年以上を経てもなお日本人に残る集団主義，没個性的な体質を払拭して，個人の特性や生き方を重視した価値観へ転換していくことがいよいよ問われているともいえよう。もう一つは，この災害を，文明災と表現し，科学技術の発展と結びついた創造型の文明，つまり，新しい製品を大量に製造したり，人工物の限界を超えることに目標設定された文明が，必ずしも心の豊かさや，安心につながらず，人を幸福にするとは限らないことへの認識を新たにする契機となったという意味での転換点である。特に，電力の大量供給という物質文明に大きく寄与してきた原子力発電所が，事故によって人間社会に恐怖と不安を与える元凶と化したことは，文明災という視点のリアリティを浮き彫りにしたといえよう。物質文明が万能ではないことを認識して，精神的な豊かさや安定をより重視しようという議論が強まっていくこともこの転換を特徴づけるといえよう。筆者のように物質と精神が密接な関係を有すると考える者は，この転換期には，物質文明と精神世界がともに変わり新たな調和を見出すことが必要と考えざるを得ない。そこで日本の科学者は何をなすべきか？多くの科学者にとっての研究環境はそう大きな変化に曝されていないのだから，これまでの研究を継続することは悪いことではない。しかし，同時に，災後や文明災が予見する大きな変化の中で，科学に何が求められているのかに静かに耳を傾け，日本が先駆け的に体験することになったこの転換期における科学の役割をじっくり考えてみることも小さなことではない。

（2012年２月５日 記）

時論

わが国におけるエネルギー政策について

内田　厚(うちだ・あつし)
全国電力関連産業労働組合総連合
事務局長
中部電力労働組合本部,執行委員,書記長,
副委員長を歴任。2007年より現職

はじめに

東北地方太平洋沖地震では強い揺れと津波の影響により，発電設備や送配電設備にも甚大な被害が生じることとなった。とりわけ，福島第一原子力発電所における被災は放射性物質の放出という事態になったが，政府ならびに関係府省庁，自治体，メーカー，建設業の皆さま方などのご支援とご協力を頂き，目標であった年内の冷温停止状態を行うことができた。引き続き，放射線管理をはじめとする作業安全や健康管理について十分に点検を行い作業を進めていきたい。

当面する電力需給問題への対応

今回の震災では火力発電所が崩壊的な被災を受けたこともあり，東北地方では最大で約460万戸が，関東地方では最大で約405万戸が停電することとなった。

震災発生直後はもとよりその後の電力供給力の不足に伴い，やむを得ず計画的な停電をお願いすることとなった。また，昨夏の電力需給状況は非常に厳しく，電気事業法に基づく電力使用制限令が東北および東京電力管内において発動されるなど，全国的に電力供給力不足に陥ることとなったが，国民の皆さま，産業界の皆さまなどさまざまな分野で多大な節電のご協力をいただいたことにより，大規模停電は回避することができた。しかしながら，今冬から夏にかけての電力需給の逼迫状態は解消されておらず，その要因は定期検査終了後の原子力発電所が再稼動できないことにある。

福島第一原子力発電所の事故を受けて，全国の原子力発電所では津波による全電源喪失等の緊急安全対策を行ったが，ストレステストの実施や再稼動の条件と判断が示されていないこともあり，電力の安定供給に資する電源の確保はできていない。

仮に定期検査終了後の原子力発電所が再稼動できないのであれば，「電源の不足分はどのようにするのか」「節電でどこまで対応可能なのか電力使用制限令を発動するのか」「産業や雇用さらには日本経済への影響はどうなのか」という現実的な検討を行ったうえで，当面する電力需給問題の判断を行うべきである。

エネルギー政策を議論する上での基本

何事にも安全は優先されなければならない。これは原子力発電所に限ってのことだけでなく，作業安全や交通安全などを含め全てに共通するキーワードである。安全の確保を前提にして，電力をいかに供給するかということになるが，これもまた不変かつ共通の認識を持つことができると思うが,「エネルギー安全保障・安定供給」「経済成長」「地球環境保全」という，いわゆる３Ｅの視点である。

エネルギー安全保障・安定供給

わが国は２度のオイルショックを経験し，過度な化石資源への依存体質の改善や資源のベストミックスと高効率化に取り組んできたが，その政策の一つに原子力発電所の推進や核燃料サイクルがあった。化石資源の産出国には政情不安を抱える国や社会主義国家もあり，安定的に資源を確保できるのかどうかという課題を常に抱えなければならない。化石資源の調達コストの問題と合わせ，戦略的な対応が必要であることを認識しておかなければならない。

経済成長

次に考えなければならないことが経済的視点でコストになる。政府内では原子力発電を含めた各電源のコストの検証がなされ報告された。賠償費用をコストに織り込むのであればその事故の確率を算出する必要があるし，発電単価比較を行うのであれば数十年とも言われる設備の稼働率を算定しなければならない。

そこで出た数値に何の意味があるのかということを言うつもりはないし，その作業自体を否定するつもりもない。ただ現実的な話として，今，定期検査終了後の原子力発電所が再稼動できない状況にあり，仮に全部の原子力発電所が停止し，その代替電源を火力発電所で賄った場合の燃料費は全国で年間３兆数千億とも言われ，これは電気料金の２割に相当する。新聞記事やテレビでよく原子力発電所を全部停止した場合のコスト上昇は２割程度であり，家庭用電気料金が１～２千円/月上昇すると

いう記事を見る。間違った報道ではないと思う。ただ，この種の報道では産業用の電気料金値上げの話しはほとんどない。わが国のものづくり産業の生産コストが上昇し，それを価格転嫁した場合の経済の影響はどうなのか，グローバル市場で競争できるのか，空洞化問題や雇用の影響はないのかなどの議論が行われないことに憤りを感じる。それよりも，この議論は前述したが安定的に化石資源が輸入できることを前提としている。安価に火力発電所が建設できたとしても，その燃料である化石資源が輸入できなければ宝の持ち腐れとなる。これが資源を持たないわが国の宿命であることを認識する必要がある。

地球環境保全

次に，環境に対する視点であるが，折りしもCOP 17が閉幕した。京都議定書の単純延長をしなかったから評価に値するというムードが漂っているように見える。しかし，少なくとも3.11までは温暖化対策一色の感があった。私たちはこの温暖化問題に関しては，対策に莫大なコストがかかり経済や雇用への影響も図り知れないことからも，わが国の技術力を国際的に活用し温室効果ガス削減に貢献すべきと主張してきた。しかし，国内では再生可能エネルギーの買取制度や環境税・排出権取引などの経済的手法のみが議論されていた。そして，3.11の東日本大震災で福島第一原子力発電所事故が起き，全国の原子力発電所が次々と停止し，その代替電源を火力発電所で賄ったことから，温室効果ガスは削減どころか大幅に増えている状況になっている。わが国の温室効果ガス排出量はCO_2換算で年間12～13億トンであるが，全ての原子力発電所が停止し，その代替電源を火力発電所で賄った場合，年間CO_2排出量は15～16%増加することとなり，排出権でカバーすれば年間数千億円もの費用が必要となる。ここにきてようやく，わが国の技術力を生かした国際的な温暖化対策の実施という言葉が聞かれるようになったが，その発端となったのが福島第一原子力発電所の事故であったとはいかにも皮肉なことでないか。

再生可能エネルギー

温暖化対策や原子力に代わるエネルギーの課題には必ず再生可能エネルギーが議論になる。そのコストとか電力系統に接続した場合の課題などの論点はあるが，再生可能エネルギーの課題を列記しすぎると導入に否定的といわれることが多々あるので，ここでは「再生可能エネルギーの導入拡大は必要であるが，現時点ではベース電源の役割を担うことは期待できない。」ということだけ申し上げたい。

山手線内側の面積は65 km^2といわれているが，ここに太陽光パネルを敷き詰めると最大出力はおおよそ100万kWとなる。しかし，この100万kWというのは真夏の昼間の出力と解釈していただきたいが，24時間・365日の平均出力は12万kW程度となり，これは大規模な水力発電所の1基分程度である。家庭用で使用する程度の電力を太陽光発電で供給することは可能かも知れないが，工場やオフィスビルに供給することができるかどうかお分かりになると思う。

ドイツのエネルギー事情

よくドイツは再生可能エネルギーの先進国である。ドイツにできたことが日本にどうしてできないのかと言われる方がみえる。確かにドイツは風力発電や太陽光発電を積極的に導入しているが，その実態の全てを明らかにしないで日本国内の議論が行われているのでないか。ドイツの発電電力量の約6割は火力発電であり，その大部分が石炭火力である。また，原子力発電も2割超あり，電気料金もここ数年間に4割ほど上昇している。電力系統が各国で繋がっている欧州と島国である日本の事情など技術的な条件も異なる。

電気事業体制について

電気事業体制，とりわけ，発送配電分離議論が行われている。いついかなる時も，電力の安全・安定供給を支えるのは，24時間365日，現場第一線で懸命に働く「人」である。今般の大地震や大型台風など大規模自然災害時において発揮されてきた電力労働者の高い現場力とこれを支える強い使命感と誇りは，現行の発送配電一貫体制のもとで長年築き上げられてきた世界に誇れるべきわが国の財産であることを忘れてはならない。

おわりに

今，国レベルでわが国のエネルギー政策の議論が行われている。野田総理は原子力の課題を二項対立で議論するべきでないと所信表明で述べた。そのとおりだと思う。あらゆるデータや知見を正しく国民に提示しながら議論を進めていくべきだと思う。エネルギー政策は国家の存亡に関わる極めて重要なテーマである。かかわる全ての団体や関係者が正しく国民に伝え，正しく議論することが社会的な責務であり，都合のいいことだけを言ったり，都合の悪いことは伏せるということがあってはならない。今も我々の組合員や仲間が福島第一原子力発電所での作業や電力の安定供給を行うため必死になって頑張っている。電力の安全・安定供給を通じ社会に貢献すべく引き続き労働組合としての役割を果たしていきたい。

（2012年1月5日 記）

時論

原発事故後の科学技術と社会との関係

藤垣 裕子(ふじがき・ゆうこ)
東京大学教授
東京大学大学院総合文化研究科博士課程修了。東京大学助手，科学技術政策研究所主任研究官，東大大学院総合文化研究科助教授を経て2010年より現職。専門は科学社会学，科学技術史。

本稿の目的は，2011年３月11日以降におきた地震，津波，原子力発電所事故を科学技術社会論の側面から分析し，事故後の科学技術と社会との関係について考えることである。

まず,今回の日本での出来事を外国の同業者(科学技術社会論の専門家)に説明する過程で，日本語の「想定」という言葉が多義性を含んでいることが明らかになった。たとえば，原子力安全基盤機構は，2010年10月に電源喪失という事態を想定した(predicted)シミュレーションを行い公開していた。それにもかかわらず,現実の電源喪失は想定されておらず(unexpected)，対応が現場で訓練されていなかった。さらに，釜石市では津波の高さが想定(assumption)以上であったため，避難訓練どおりに避難した人が50人以上も亡くなった。これで少なくとも３つの意味が同じ想定という言葉で用いられていることが示唆される。問題は,科学的合理性(自然科学による確率予測)としては predicted であったのに，社会的合理性(実際に社会的対策が行われるための設計基準)としては unexpected として扱われていたという点である。

設計基準をどう設定するかについては，日本原子力学会誌でも，「根本的な問題は，設計外力を含めた設計条件をどの大きさ(あるいは範囲)に設定するかであり，そこには行政や施主の判断も入ってくる。」「……最終的な設計条件が決められることになる。その線引きを誰がやるかについては，残念ながら明確な答えはでてこない。」(Vol. 54, No. 1, p 2, 2012)といった記述が見られる。この設計基準の線引きについて，「リスク社会論」を著したウルリヒ・ベックは「ある負担がまだ耐えられる状態なのか否かの境界線をどこにどのように引くべきなのか」というリスクの許容限度の話しをしている。そして，自然科学が我々に提供できること(科学的合理性)は，ある事象が生起する確率だけであること，その事象がひきおこすリスクの許容限度(社会的合理性)については，社会の側が判断をしなくてはならないことを述べている。後者の境界線の設定には，前者の確率をもとに「判断」が入り込む。人の健康や環境保護などの何らかの守るべきものへの価値判断があってこそ,後者の社会的合理性が決まる。

これまで日本では，主に原発のリスク許容限度を決めてきたのは,原子力委員会,原子力安全委員会,保安院,といった行政および専門家の集団であった。社会機構といっても，「行政と専門家」に閉じられた空間で決められてきた。しかし，今回の事故を機に，ほんとうにそのような閉じられた空間でのみ決定してよいのか，ということを議論していく必要があるだろう。リスク許容度を誰がどうやって決めるのか，具体的な国際比較研究をみてみよう。2005年８月にハリケーン・カトリーナが米国南部のニューオーリンズを襲ったとき，死者1,695人，行方不明者135人がでた。このとき，あるオランダの研究者は，「なぜオランダでは水を締め出すことに成功しているのに，なぜニューオーリンズではこんなに多くの死者と行方不明者がでたのか」と疑問に思い，両者の比較研究を始めた。まず，米国の海岸工学は，オランダの海岸工学と比べて遅れていたのだろうかという疑問をもとに調査を行った。その結果，米国の海岸工学のレベルが低かったという証拠は見つからず，これは工学のレベルの問題ではなく，何か別のことが進行していることが示唆された。さらなる分析の結果，両国の間で，海岸工学のスタイルが異なり，リスク概念も異なること，および異なるリスク概念が異なるマネジメント手法を生み，単なる技術以上の差を生み出していることが示唆された。

より詳しくみていこう。米国では，海岸工学においては「洪水災害の軽減」が目標として掲げられていたのに対し，オランダでは，「水の浸入を締め出しつづけること」が目標であった。また，リスク許容限度については，米国では100分の１の確率で大災害が起こることを想定し，100年に一度の大災害以外は，土地を守れるように行動した。これに対し，オランダでは，10,000分の１の確率の大災害を仮定し，「10,000回に１回しか，災害は起こってはならない」とした。さらに，リスク産出の主体にも違いが見られた。米国は海岸工学の専門家が上記のリスク許容限度を決めていたのに対し，オランダでは，デルタプラン法という法律によってリスク許容限度を決めていた。堤防の高さも，議会のなかで法的に定められた。他の方法でリスクを定めることは違法とされた。米国では，リスクの算定は技術的ルールによって決まり，法律とは関係ないのである。

ここに見られる違いは,米国では,リスク許容限度を,工学というアカデミックな専門職内部のルールで決めてきたのに対し，オランダでは，専門家に閉じられた形ではなく，議会に開いて議論してきたということである。低地国として何度も水害に襲われた経験から，専門家だけに任せない仕組みを作ったのである。日本におけるリ

スク許容限度は，上にも述べたように，多くは専門家に閉じられた形で決められている。この形式がほんとうによいのか，あるいは，将来何万分の１の確率で起きる地震まで想定して，原発の安全を考えるのか，専門家が閉じた形で決めるのではなく，国会で議論したり，市民が加わって議論する道や手段を考えたりすることが必要となるだろう。

続いて問題にしたいのは，事故後の科学コミュニケーションの問題である。情報流通における課題である。たとえば，テレビによる保安院・東京電力による記者会見の情報とウェブ上のツィッターや掲示板による情報との乖離，専門家間の意見の相違(物理学者，原子力工学者，放射線医学者間の違い)，同じ専門分野の専門家による意見の相違などである。この違いをどう扱うか。2011年11月３日，米国クリーブランドで国際科学技術社会論学会と米国科学史学会と技術史学会の合同のプレナリーが「フクシマ」をテーマに行われた際，３学会をそれぞれ代表する原子力技術史あるいは原子力社会論の研究者たちが発表を行ったが，そのなかの一人が，作業服を着た菅首相(当時)と枝野さんのスライドを映し，「日本政府はDis-organized　Knowledge を出しつづけた」と説明すると，800人の聴衆から失笑が漏れた。それでは Organized な知識とは何か。日本学術会議は「専門家として統一見解を出すように」という声明を出したが，これは unique，あるいは unified と訳される。Organized であることは，ただ１つに定まる知識(unique)とは異なる。異なる見解を統一(unified)することとも異なる。日本政府および日本の専門家は，時々刻々と状況が変化する原子力発電所事故の安全性に関する事実を１つに定めること，統一することに重きをおき，Organized な知識(幅があっても偏りのない，安全側にのみ偏っているのではない知識)を発信することができなかった。しかし，これは日本政府と専門家と市民の科学コミュニケーションの問題である。

政府は，無用なパニックを避けるために「ただちに問題はない」と言い続けた。しかし，無用なパニックを起こすほど日本人の知性は低いのだろうか。政府・専門家は国民のリテラシーを低くみているからこそ，安全側に偏った情報を流したのではないか。そして逆説的なことに，安全側に偏った情報しか流さない政府を市民が信用しなくなるという現象がおきた。また，福島県の高校に勤める理科の教諭は，「政府は混乱させたくないというが，事故が起こったこと自体がもう混乱である。また，１つの答えを出したいというが，いろいろな情報が出るのが当然であり，そんなことはわかっている。統一した１つの情報を出したいと専門家はいうが，統一された１つの情報が欲しいわけではない。全部出してほしい。その上で意思決定は自分でやる。」と述べた。ここで観察されるのは，専門家や政府が行動指針となるような「統一された１つの情報」を出すことが責任と考えているのに対し，市民の側が「混乱してもいいからたくさんの情報」「幅があってもいいから偏りのない情報」が必要で，意思決定は自分でやる，次の行動は自分で決める，と述べていることである。そして市民にとって何が不安かについては，専門家や政府が「きちんとした情報がないのが不安」と考えているのに対し，市民の側は「情報が偏っているのが不安」と答えた。さらに専門家や政府が「混乱させるのが不安」と答えたのに対し，市民の側は「専門家が信用できないのが不安」と答えた。これらは専門家や政府の考える必要な情報，与えるべき情報と，市民の側の望む情報とのギャップといえよう。もちろんここで，「１つに決めてくれないと行動できない」と言った市民もいたことを付け加えておこう。これら情報発信に関する問題は，科学者の責任に関して新たな課題を提示する。心配させないように情報を出すのが科学者の責任か。それともすべてオープンにした上で市民に選択してもらうのが責任か。

今回の事故は，民主主義国家で起こった未曾有のレベルの原子力発電所事故である。チェルノブイリは社会主義国家下で起こった事故であることを考慮すれば，今回の事故後の情報流通が民主主義国家として胸を張れるものであったのかどうか，反省が必要だろう。日本は民主主義国家として事故後の対策において模範となれるのだろうか。世界は，日本が民主主義国家としてどうやって今回の事故を社会の議論として収束させるかに注目している。おそらく，小手先の安全論議ではなく，「決め方」のプロセスも含めて世界に発信できるものが必要だろう。

今回の事故で行政や科学者への不信が高まったことは事実であるが，これが日本の科学技術と社会が本来の信頼関係を結ぶきっかけとなることを期待したい。たとえば，行政や科学者は，ただ１つに定まる知識(unique)にこだわるあまり，Organized な知識を発信できなかった情報発信のありかたを見直すことが必要だろう。市民の側の動きも，福島県郡山市や千葉県柏市の市民の側にでてきた「自ら測る」動きは，日本のパターナリズム(お上に任せておけば大丈夫)という考えを超えて，自律の兆しと考えることができる。市民の側が「混乱してもいいからたくさんの情報」「幅があってもいいから偏りのない情報」が必要で，意思決定は自分でやる，次の行動は自分で決める，となれば，行政や科学者の側も安心して Organized な知識を流せるようになるだろう。本来，複数のメディアがあり，そこで紹介される意見に違いがあるのは当然であり，また専門家の意見は割れて当然である。その中から信頼できる情報を選び，複数の異なる意見を言う専門家の意見を聴いて最後は国民が決める，という程度に成熟した社会になることが必要である。(それが民主主義社会の定義であったはずだ。)このように，今回の経験をもとに日本が変わっていけること，日本の科学技術と社会の関係が成熟していくことを望む。

(2012年２月13日　記)

特別企画　我が国の核燃料サイクル

核燃料サイクルについての正しい理解を

東京大学　田中　知

東京電力福島第一原子力発電所事故の後，これからのエネルギーについての議論が政府のエネルギー・環境会議で行われている。そこでは，エネルギーベストミックス，およびエネルギーシステム，国民合意の形成の３つについて具体的な方向性を示すことになっている。そのなかで，昨年末にはコスト等検証委員会の報告があり，今後エネルギーシフトや核燃料サイクルついての戦略が提示されることになる。その議論に資するために，総合資源エネルギー調査会基本問題委員会でエネルギーベストミックスの検討が行われ，原子力委員会では核燃料サイクル選択肢の検討が行われる。原子力委員会原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会では，核燃料サイクルの選択肢を構成する要素の特性(技術，安全性等)及び評価軸の整理が行われた。今後，本小委員会では第２ステップとして，核燃料サイクルの政策選択肢の評価軸毎の分析，そして第３ステップで，エネルギーミックスの選択肢を踏まえた核燃料サイクルの政策選択肢の定量的評価と問題提示が行われる予定である。

これらの国レベルでの検討と合わせて，原子力に関する正しい情報を発信していくことが学会の役割である。原子力エネルギーの在り方についての議論はややもすれば，推進，反対の二項対立になりやすい。推進側からすれば，原子力はエネルギーセキュリティーに優れる，地球温暖化ガスを発生しない，安全は十分な対策をすることで確保できるなどの意見が多い。反対者から見れば，事故前と何も変わっていなく，表面的すぎるとの意見が出る場合がある。また，反対者からは，安全といいながら事故を起こした，サイクルは重要といいながら六ヶ所再処理工場はなかなか本格操業にならない，「もんじゅ」も長年停止していることなどは我が国の技術力が低いことを示しているのではないかという意見もある。また，高レベル放射性廃棄物の処分サイトがなかなか決まらないのは大きな問題である。将来に渡ってこのような高レベル放射性廃棄物を排出し続けるのは問題であるという意見も聞く。このような推進，反対にからむ様々な意見には一理ある部分もあるが，その問題の背景や，それらに関する正しい情報，解決の可能性なども含めて，丁寧な議論が必要である。エネルギー政策は国の最重要な政策の一つであり失敗は許されない。各電源の正しい情報に基づいた適切な政策決定が求められている。

日本原子力学会の使命の一つにこのような原子力エネルギーについての正しい情報を発信することがある。これには，技術的なものもあれば，人文社会学的なものもある。技術的なものには，社会費用以外のコスト，燃料利用率，使用済燃料発生量・貯蔵量，プルトニウム回収量・貯蔵量，放射性廃棄物発生量，発熱，毒性の時間変化，技術的成熟性，安全確保方策，核不拡散，核セキュリティー技術などが含まれる。また，人文社会学的な情報には，社会的コスト，国際関係，エネルギー地政学，社会的受容性，国民の安心を如何に得るか，そしてリスクガバナンスの在り方などがある。

また，国の原子力政策を考える場合には，原子力開発の歴史を知ることも重要である。そこには，エネルギー政策，原子力を持つことによる国のステータス，国の技術力，当時の国際政治，世界における核兵器開発等とも関係している。これらは，そのままを現在に当てはめることはできないが，これからの原子力を考える際の，正しい情報の発信において参考になることが多い。この特集では，まず，河田氏からの「日本の核燃料サイクル－その意味と歴史的重み」という解説が示されている。そこでは，我国で原子力開発の当初からウラン利用効率を上げるために再処理リサイクル路線が選択されたこと。インド核実験の後のカーター政策による核燃料サイクルに対する厳しい見方やその中で我国の勝ち得た権利や，国際核燃料サイクル評価での議論が詳しく示されている。また，高速増殖炉開発の歴史と現状，放射性廃棄物発生量や直接処分の際のプルトニウム核拡散の問題点，関係地元との信頼・緊張関係の歴史的重要性，人類史におけるエネルギーなどが記述されている。

次に山名氏により，使用済燃料の発生量の展望，技術小委員会におけるコスト評価やバックエンドのシナリオと判断，“フィッサイル”資源の“資源価値”など核燃料資源について詳しい分析がある。また，核燃料サイクルコストの分析結果を含めて，今後の核燃料サイクル戦略についての考察も参考になる。

この解説は核燃料サイクルを中心として今後の原子力政策を考える場合の重要な情報源となることを願う。

今後の政策決定においてはこれらに付け加えて，ウラン資源量の評価と資源獲得，中国，インドでの急速な発展と原子力の拡大，中国，インド，ロシア等での高速炉開発の進展，北朝鮮における核実験と朝鮮半島の不安定性，2018年の日米原子力協定見直しに向けての議論などが重要となる。これらのような人文社会学的観点についても日本原子力学会として解説を今後行いたい。

(2012年３月２日 記)

特別企画　我が国の核燃料サイクル

日本の核燃料サイクル
その意味と歴史的重み

原子力発電環境整備機構　河田東海夫

2011年３月の東京電力福島第一発電所事故の深刻な影響は，国民に大きな衝撃を与え，世論は脱原発に大きく傾いている。こうした中で，政府は昨年より，原発への依存度低減を主軸にしたエネルギー政策の見直しを進めている。本報告では，わが国が原子力の開発・利用を進め，特に核燃料サイクル政策では再処理リサイクル方式を選択してきた歴史的経緯を振り返り，その意味をあらためて検証してみる。

わが国の原子力開発・利用の歴史は，「技術力を資源とする巨大電力生産システム」の構築に向けた壮大な努力の歴史である

1953年12月の国連総会で米国のアイゼンハワー大統領が「Atoms for Peace」演説を行った３ヵ月後の1954年（昭和29年）３月２日，改進党の青年将校といわれた当時30歳の中曽根康弘議員は，予算委員会最終日の採決直前に，２億３千５百万円の原子力予算を盛り込む予算修正案を急遽提出し，これを認めさせることに成功した。敗戦国であり被爆国であるわが国も原子力の平和利用で遅れを取ってはならないとの熱い思いからであった。日本の原子力は，こうして産声をあげ，エネルギー資源小国における「技術力を資源とする電力生産システム」構築に向けての努力が開始された[1)]。

特に，1973年の第１次オイルショックは，技術産業立国として生きる日本におけるエネルギー安全保障の重要さを再認識させ，発電部門では，石油依存を低下させ，「ベストミックス」を目指すべく，原子力利用拡大が加速された。発電装置である原子炉としては，世界的に低濃縮ウランを燃料とする軽水炉が普及し，わが国では，2010年末時点で54基が稼動，総設備容量は約4,900万 kW に至り，総発電量の約３割を支える基幹電源へと成長した。**第１図**に，発電容量の歴史的変遷を，関連する主要な核燃料サイクル事業の展開とともに示す。

原子力発電を安定的に続けるためには，燃料供給の安定性確保に加えて，いわゆる「バックエンド」に関する確たる方針と具体的なシステム作りが不可欠である。バックエンド政策に関しては，ウラン資源も輸入に頼らざるを得ないわが国では，当初からウランの利用効率を上げる「再処理リサイクル」路線が選択され，再処理技術や，それに伴う MOX 燃料利用，廃棄物処分の技術などを実産業として具現化するための努力が営々と続けられてきた。六ヶ所村における日本原燃の再処理施設や廃棄物関連施設などは（すべてが完成しているわけではないが），そうした長年にわたる努力の結実である。

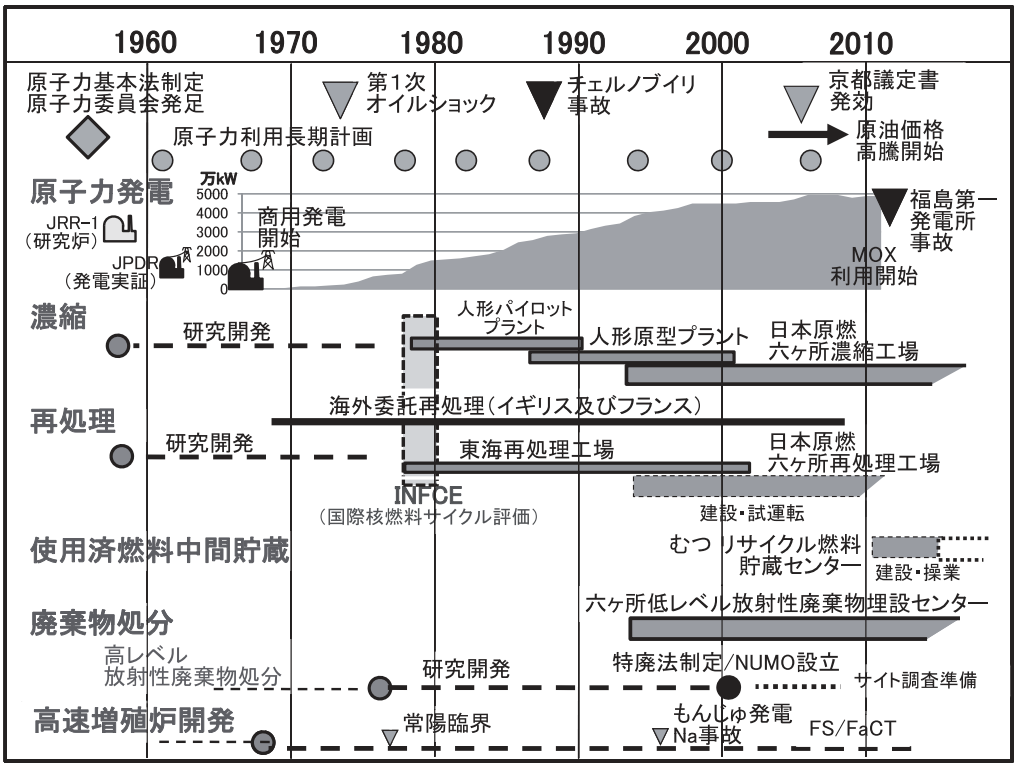
高レベル放射性廃棄物（高レベル廃棄物）の処分問題は，原子力利用を安定的に続ける上で，ぜひとも解決すべき事項であり，四半期にわたる研究過程を経て，2000年に地層処分を事業として進めるための法律と体制が整備された。実施主体としての原子力発電環境整備機構（NUMO）の活動は，いまだ処分場候補地選定の第一段階である文献調査に入れずに今日に至っているが，実現に向け国民的理解をさらに深める努力が求められている。

資源に恵まれないわが国にとって，ウランの利用効率を格段に高める高速増殖炉サイクルは当初から魅力的なオプションであり，その実現に向けての研究開発が，困難に遭遇しつつも地道に続けられている。

狭い国土に１億人を超える国民を抱えるわが国は，工業中心の産業で生きることを運命付けられており，良質な電力の安定供給は，その産業を支える重要な基本要件の一つである。わが国の原子力開発・利用の歴史は，エネルギー資源に乏しい中で，長期的な電力安定供給を盤石にすべく，官民が協力して「技術力を資源とする巨大電力生産システム」の構築に向けて挑んできた壮大な努力の歴史であり，各地の原子力発電所や六ヶ所村の核燃料サイクル関連施設は，単に技術面の課題克服だけでなく，立地地域との信頼関係構築という政治・社会的に最も困難な過程をも包摂した，巨大な国民的財産である。

Nuclear Fuel Cycle in Japan—It's Historical Implications: Tomio KAWATA.

（2012年　２月27日　受理）



第1図　日本の原子力利用の歴史

非核兵器国でありながら，核燃料サイクルを進めるわが国の特異な地位は，国際政治上きわめて貴重な日本国民の無形資産である

わが国の核燃料サイクルは，1970年代，国際政治の荒波の中で大きな難局に遭遇した。それは，1974年，インドが核実験を行い，世界に大きな衝撃を与えたことに端を発する。1977年に発足した米国のカーター政権は，核不拡散対策を最重視する立場から，米国における再処理と高速増殖炉開発を凍結する劇的な原子力政策変更を発表した。当時，日本は，動力炉・核燃料開発事業団(動燃)の東海再処理工場がホット試験開始直前であり，日米原子力協定で米国籍の燃料の再処理は事前協議対象であったことから，試験開始の是非をめぐり，日米政府間で厳しい対立が起きた。当時の福田首相とカーター大統領の直接会談の後，日本側は宇野宗佑科学技術庁長官を筆頭に，外務省，通産省の協力と，動燃実務陣の支援のもと，挙国一致体制を築いてこれに対応した。再処理工場の合同調査を含む，半年間，3次にわたる粘り強い交渉の末，遂に米国に2年間99トンの試験処理を容認させ，東海再処理工場のホット試験が開始された[2)]。

その後，原子力技術と核不拡散規範との両立に関する議論は，カーター大統領の提言で発足した国際核燃料サイクル評価(INFCE)というさらに大きな舞台に移された。INFCEでは，最終的に59ヶ国と6つの国際機関から500人を超える専門家が参加し，核不拡散の観点から，再処理，濃縮，プルトニウム利用などについて，2年以上にわたり集中的な評価検討を行った。その結果，1980年2月に2万ページを超える報告書をまとめ，「保障措置技術の改良を進めるとともに，国際制度の整備や核不拡散に有効な技術代替手段の確立を図ることによって，核不拡散と原子力の平和利用は両立しうる」との結論を公表した。日本は，この大きな国際検討の場においても，英国と共に再処理やプルトニウム利用を検討する第4ワーキンググループの共同議長国を務めるなど，積極的な貢献を行った。こうした活動に加え，この大事な時期に再処理工場の運転をすでに開始しており，自主技術による濃縮パイロット施設の稼動を間に合わせたという実績によって，わが国は，非核兵器国でありながら，再処理や濃縮など，核燃料サイクルの要となる事業を自ら行える国としての特異な地位を確保すること成功した。

核拡散防止条約(NPT)加盟国であるわが国の原子力活動には，国際原子力機関(IAEA)の保障措置制度に基づく厳格な国際査察が適用されるが，その後，追加議定書を批准し，2004年9月から統合保障措置が適用されたことで，現在では査察業務について一定量の低減措置が講じられている。統合保障措置は，IAEAによる広範かつ綿密な調査の結果として，核物質の不正転用や，未申告の原子力活動などの不正がないことが確認された「優良国」のみに適用される制度である。2004年のIAEA総会でエルバラダイ事務局長は，「日本が先進的な核燃料サイクルを進める国として統合保障措置の適用を受ける最初の国になったことをお知らせでき，大変喜ばしい」と述べた。わが国への統合保障措置適用は，産業成熟国においては核燃料サイクルと核不拡散規範が両立しうる

ことを示す模範例であり，国際的に大いに誇るべきことといえる。核不拡散の領域におけるわが国の長年にわたる模範的態度は，核燃料サイクル推進国であるわが国への国際信用強化に大きく貢献している。

日本はNPT下の非核兵器国として再処理を含む核燃料サイクル事業全体を推進する唯一の国家であるが，この特異な地位は決して容易に得られたものではない。上述したように，早くから自立的な核燃料サイクル実現に努めてきた先人の先見性と，日米再処理交渉とその後のINFCEにおける挙国一致体制による奮闘によって獲得した，国際政治上きわめて貴重な地位であり，一旦放棄すれば2度と回復不能な，日本国民の重要な無形資産である。

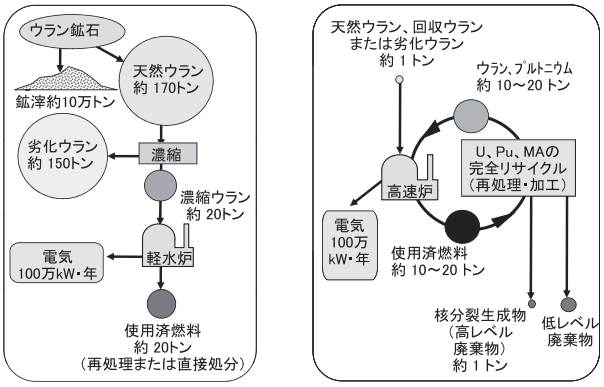
高速増殖炉サイクルは新たな燃料調達を不要とし，「技術力を資源とする恒久的巨大電力生産システム」であり，化石燃料枯渇時代の救世主となりうる

ところで，世界で最初に原子力発電を行ったのは，米国の高速増殖炉EBR-Ⅰである。EBR-Ⅰは，1942年12月に人類最初の核分裂連鎖反応炉CP-1の実験を成功させたエンリコ・フェルミの右腕で，アルゴンヌ国立研究所の初代所長となったウォルター・ジンが，アイダホに建設した実験炉で，小型発電機を持ち，1951年12月20日にはじめて4個の電灯を灯した。原子力の黎明期，ウランは希少資源と考えられており，フェルミらのグループは，原子力の本格的平和利用のためには，非核分裂性のU-238をプルトニウムに転換して燃やせる高速増殖炉が不可欠であると考え，戦後早い時期から開発に着手した。

その後，低濃縮ウランの民生利用の道が拓けたことや，世界各地でウラン資源開発が進んだことから，構造的により簡単で経済性に優れる軽水炉が世界的に普及した。

しかしながら，軽水炉利用体系の根本問題は，基本的に天然ウラン中に0.7%しか存在しないU 235の核分裂を利用するシステムであることから，ウラン資源の利用効率が1%に満たない，極端な「資源浪費システム」であることである。使用済燃料を再処理し，リサイクル利用することは可能であるが，それでもウラン資源の節約は10〜20%に留まる。軽水炉体系のみに依存し続ける限り，地中のウラン資源も，化石燃料とさほど変わらない時間オーダーで消耗してしまう。

第2図に，電気出力100万kWの軽水炉と高速増殖炉を1年間運転するのに必要とする天然ウラン供給量の概念的比較を示す。軽水炉では，毎年170トンの天然ウランの供給が必要であるが，高速増殖炉の場合，燃料をリサイクル利用することにより，外からのウラン供給は毎年1トンで済み，しかもそのウランは天然ウランではなく，ウラン濃縮で残渣として大量に生ずる劣化ウランでもよい。この図から分かるように，高速増殖炉サイクルは，原理的には軽水炉に比べて170倍のウラン利用効率を達成できる。



第2図　軽水炉と高速増殖炉の比較

高速増殖炉というと，日本では「プルトニウムを燃料とし，燃やした以上のプルトニウムを生産する炉」との認識が広まっているが，筆者は「燃えないウラン（U 238）をプルトニウムに変換しつつ燃やし尽くす炉」と解釈したほうが，その性格をより的確に表しているように思う。

2005年時点で，ウラン濃縮で生じた劣化ウランと再処理で回収され残存するウランの蓄積量は，全世界で約160万トンに上る。世界の原子力発電の総設備容量（重水炉なども含む）は現在約38,000万kWであるが，仮に増殖炉サイクルが実現したとすれば，160万トンのウランは，38,000万kWの発電所の2,000年分以上の燃料となる。したがって，高速増殖炉サイクルの実現は，既に地上に掘り出され，残存しているウランだけで，人類に「半恒久的な巨大電力生産システム」をもたらす。この電力生産システムは，燃料供給面ではあらゆる束縛から完全に解放されるため，まさに「技術を資源とする巨大電力生産システム」の究極の姿といえる。このようなシステムは「化石燃料枯渇時代の救世主」たりうる資格を持っている。

高速増殖炉技術は，「もんじゅ」の事故による長年の停止とその後の修復過程でさらにトラブルを生じたことから，メディア報道は概して批判的であり，その結果，特にナトリウム冷却は実用化の障壁が高い技術との印象がすっかり定着してしまった感がある。しかしながら，ロシアでは，1982年に運転を開始した発電炉BN 600（電気出力60万kW）が，2008年までの27年間の平均稼働率で約74%を達成しており，また米国では1994年に閉鎖された高速実験炉EBR-Ⅱ（電気出力2万kW）が最後の10年間に約80%の平均稼働率を達成している。わが国の高速実験炉「常陽」も，発電能力はないが，大きなトラブルもなく約30年間の運転を続けてきた。このように，高速増殖炉は，現状技術でもきちんとした管理をすれば安定運転が可能な炉であり，現にロシアはBN 600の良好な運転実績を背景に，現在，電気出力80万kWの炉の建設を進めており，さらに出力1,200万kWの炉の建設も計画している。また経済発展が著しいインドでは，25年に

わたる高速実験炉の運転経験をもとに建設を進めている出力50万 kW の原型炉が既に完成しつつあり，その後，2023年までに同規模の実用炉を 6 基建設するという意欲的な計画を進めている。わが国では経済性の面で直ちに高速増殖炉を導入するインセンティブはなく，次世代炉として更なる経済性や安全性の向上を目指す研究が進められているが，必要性が高まればいつでも実用化に向けて開発を加速できる技術基盤は整っている。いわば「必要になれば手の届く技術」なのである。

高速増殖炉サイクルは，使用済燃料中に蓄積するアメリシウムなど，いわゆるマイナー・アクチニド元素(MA)をも回収リサイクルすることで，高レベル廃棄物の発熱を低減させることができ，その結果，同じ発電量あたりで必要とする処分場面積を，軽水炉サイクルの場合の約半分に縮減できる。仮に2010年末時点の発電規模がずっと続くとした場合，１世紀の発電で必要とする処分場面積は12 km^2程度で済み，これはほぼ東京国際空港(羽田空港)の敷地面積に相当する。この程度の処分場であれば，１世紀にわたる国民への電力供給の1/3を原子力発電でまかなう結果の代償としては，国民にとって十分受容可能な範囲ではなかろうか。このように，高速増殖炉サイクルは，廃棄物処分の面からも，負担がより少ない電力生産システムなのである。

廃棄物処分における社会的負担軽減は発電大国にとっては重大事であり，再処理リサイクル方式はその目的により良くかなう選択肢である。

話が突然，増殖炉サイクルに飛んでしまったが，ここで現在の軽水炉に話しを戻そう。軽水炉時代の核燃料サイクルには，基本的に直接処分方式と再処理リサイクル方式の２つのオプションがあり，わが国は前述のように後者を選択している。もう一つ，使用済燃料を長期貯蔵するというオプションもあるが，それは一言でいえば決断先送りであり，選択への社会合意が難しい段階での暫定措置に過ぎない。ただし，どちらの方式をとるにせよ，一定規模の使用済燃料貯蔵能力(中間貯蔵能力)を確保することは，バックエンド管理を適正に進める上での余裕代として極めて大切である。

直接処分方式は，再処理リサイクル方式に比べ，経済的にはバックエンドコストが１割(発電原価にして１円/kWh)前後節約できる。その一方で資源利用効率は若干劣り，高レベル廃棄物処分場の必要面積は２倍前後大きくなる。発熱体であるプルトニウムをも一緒に埋設しなければならないことに起因する。再処理リサイクル方式のメリット・デメリットはちょうどその裏返しで，経済的には若干不利であるが，回収されるプルトニウムを再利用することでウラン資源を１～２割節約するというメリットに加え，高レベル廃棄物処分場の必要面積を直接処分の場合に比べ半分前後に縮減するという大きなメリットを持つ。

現在，世界の主要な原子力利用国では，高レベル廃棄物処分実施に向けての様々な努力が続けられており，処分地確保に成功した国も未達成の国も，いずれも立地にからむ社会合意形成に大変な苦労を重ねきている。そうしたことから，特に発電規模の大きな国にとって，処分場の必要面積が小さくて済むことは，社会全体にとっては，わずかな経済的メリットを凌駕する大きなメリットとなる。実際に発電規模が2,000万 kW を超えるような国(フランスやロシア，日本)や，これから大幅な規模拡大が見込まれる国(中国やインド)では，再処理リサイクル方式を採用または計画している。世界で原子力発電を行う国は30ほどあるが，再処理リサイクル方式を採る国の数はその1/4強に過ぎない。しかし設備容量的には世界の半分近くを占めており，今後，中国やインドの急速な原子力利用拡大で，その比率は大きく上昇すると見込まれる。これらの国は，いずれも長期的には高速増殖炉サイクルを実現すべく，着々と準備を進めている。なお，再処理を行うと，いわゆる TRU 廃棄物が発生し，かえって廃棄物量を増やすとの批判がある。しかし TRU 廃棄物は発熱が小さいため，コンパクトに埋設でき，高レベル廃棄物の処分場に比べればはるかに狭い処分場で済む。

原子力利用国のうち3/4弱の国が当面，直接処分方式を採用しているが，米国を除くとそれらの国の総設備容量は世界の1/4を占めるにすぎない。これらは，発電規模の比較的小さな国(スウェーデンやフィンランドなど)や，原子力廃止を目指す国(ドイツなど)であり，処分すべき廃棄物の量が限定されるので，直接処分における処分場の必要面積増大は大きなデメリットにならない。

３月の東電福島第一発電所事故以来，政府は脱原子力依存に大きく舵を切ったが，現在，急速に進みつつある産業空洞化のこれ以上の進行を抑えるためには，電力供給の安定化が必須要件の一つであり，そのためには一定規模の原子力発電の維持が必要なのは明らかである。仮に現在のレベルから半減してもわが国はなお大規模原子力発電国であり，その運転安定性を保証する現実的手立てとして，再処理リサイクル方式の堅持が必要である。

大規模発電国で直接処分方式をとる唯一の例外は，世界最大の原子力発電国である米国で，1977年のカーター政権以来，核拡散への懸念から再処理リサイクル方式を止め，以来直接処分方式を堅持している。米国では，ネバダ州のヤッカマウンテンを処分場にする計画が進められてきたが，ブッシュ政権時代の関係者は，このまま直接処分を続けると埋設効率が悪いため，今世紀中にヤッカマウンテンと同規模の処分場が何個も必要になるという厳しい現実を，切迫感をもって認識していた。そのため彼らは，いわゆる GNEP 計画の一環として，再処理政策への回帰により処分場の実効的処分容量を５倍以上拡大することを目論んだ。しかし，オバマ政権になって

地元ネバダ州選出の実力議員の強引な反対で，既に安全審査が進められていた処分場計画が放棄されることになると，その切迫感はあっけなく消え去ってしまった。

エネルギー省は，行き場を失う使用済燃料の代替管理方策を検討するブルーリボン委員会(BRC)を2010年に立ち上げ，その最終報告が本年１月末に公表された。同報告書は，「恒久的な地層処分施設と集中中間貯蔵施設の両者の実現のための可能な限り迅速な取組」を求め，その推進に当たっては，エネルギー省直轄ではなく，「使用済燃料管理の専任組織を新たに作り」，「立地プロセスは段階的で合意形成を重視した方式」にすべきと勧告した[3]。すでに６万５千トンに達する使用済燃料の累積が今後さらに増え続かざるを得ない中，今世紀中に処分場がいくつも必要となるという厳しい現実を解消するための処方箋は示されなかった。広大な土地を有する米国では，発電所サイトでの貯蔵能力増強については，地元自治体や住民との間でさしたる問題は起こらないという事情は，狭い人口過密国家日本とは根本的に異なる。

直接処分は，「プルトニウム鉱山」問題という厄介な核拡散リスクを将来世代に残す

直接処分におけるプルトニウムの埋設は，わが国では一般にはあまり説明されることがない「プルトニウム鉱山問題」という大変厄介な将来へのツケを残す。直接処分では，埋設当初は核分裂生成物の高い放射能によりプルトニウムが防護されるが，300年後にはその放射能の大部分が減衰してしまい，プルトニウムへの接近や回収の困難性は著しく低減してしまう。300年後に悪事をたくらむ国家にとっては，直接処分場の埋設物はきわめて魅力的な兵器原料となりうるのである。今のところ直接処分計画は米国やスウェーデンなど，安定でしかも限られた国で進められており，この問題を，深刻に問題視せずに済ませてきた。この問題は，処分場を国別でなく多国間で共同運営することで，ある程度リスク軽減が可能だが，それにしても埋設場所が世界各地に増え過ぎたり，埋設量が膨大になりすぎると，世界的に管理不能な核拡散リスクになる危険性をはらんでいる。仮にわが国が直接処分方式をとり，これまでの設備容量のまま１世紀発電を続けると，その結果として1,000トンを超えるプルトニウムを地下埋設することになる。この点を真面目に検討すれば，「プルトニウムを発生する世代がそれを使い尽くす再処理リサイクル方式のほうが，プルトニウム鉱山を残さないため，トータルで見れば核拡散リスクは小さい」といえるかもしれないのである。少なくとも，再処理リサイクル方式の核拡散リスクは国際保障措置の厳格な適用で管理可能なことは，長年の実績が示してきたところであるが，プルトニウム鉱山の将来リスクが管理可能なのかどうかについては，これまで真面目に検討されたことがない。核不拡散分野では主に米国でプルトニウム利用に反対の学者が主導権をとってきたが，彼らはこの「不都合な真実」に正面から対峙することを避けてきた。しかし今後，アジアやアラブなどで原子力参入国が増えると，いつまでも無視できない問題になるだろう。昨今の世界情勢は，サミュエル・ハンチントンが指摘した「文明の衝突」の様相を顕にしており，300年後の世界が今より平和で安定な世界になるという保証はどこにもないのである。

軽水炉サイクルはウラン利用の暫定システムで，様々なツケを残すが，増殖炉サイクルに引き継ぐことにより解消され，理想型のサイクルが完結する

再処理リサイクル方式をとる場合，我が国では「全量再処理か，部分再処理か？」という議論と，「MOX 使用済燃料(プルサーマル使用済燃料)はどうするのか？」という議論がある。

この問題に答えるためには，そもそも現在主流の軽水炉というシステムは，

⑴ ウラン資源の利用効率が1%にも満たない「資源浪費型システム」である

⑵ 運転で生成するプルトニウムを完全消費することができない「後始末未完結型システム」である

という，いわば理想型原子力システムに至る手前の，暫定的ウラン利用システムであることを理解しなければならない。

軽水炉においても，プルトニウム燃焼は可能ではあるが，その特性から一旦，炉に入れたプルトニウムは「高次化」という現象により核分裂性能が低下してしまうため，多重リサイクルが困難なシステムであり，そのためにプルトニウムを燃やしつくすことができないのである。高次化したプルトニウムを無理に多重リサイクル利用しようとすると，核分裂性能劣化分を補うために，MOX 燃料として混合する相手のウランの濃縮度を若干上げる必要が生じて経済性が悪くなるほか，高レベル廃棄物の発熱が一層増加してしまい，地層処分への負担を著しく増大させる。こうした問題を避けるためには，MOX 燃料は１回の使用にとどめ，その使用済燃料は長期保管し，高速増殖炉サイクルへの移行の時期がきたときに再処理・回収して，高速増殖炉燃料として燃やすのが最も合理的な使い方となる。高速増殖炉では，高次化したプルトニウムやアメリシウムなども燃やすことができるので，廃棄物処分への負担が大きく軽減できる。なお，MOX 使用済燃料の長期保管は，プルトニウムが核的に十分劣化しているので核拡散上の脅威にはならない。

軽水炉は，当分原子力発電のエースであり続けるであろうが，前述したように，あくまでもウラン利用の暫定的システムであり，大量の濃縮残渣の劣化ウラン，燃やせない高次化プルトニウム，MA などを残す。それらのツケは，高速増殖炉サイクルが実用化されてはじめて全

てが解消され，資源を最大限有効活用し，廃棄物を極小化する理想型のサイクルが完結する。

高速炉増殖炉サイクル技術が実用化に至り，退役する軽水炉を順次増殖炉に置き換える段階では，100万 kW の増殖炉１基あたり約16トンのプルトニウムを必要とするので，大量のプルトニウムの供給が必要となる。しかしその必要量は，その段階で残存する軽水炉(数は順次減っていく)から排出される使用済燃料の再処理で回収されるプルトニウムと，順次増えていく高速増殖炉で生産される余剰プルトニウムを合わせても，大きく不足する。この不足分を埋めるためには，移行期用のプルトニウム供給源としての軽水炉使用済燃料をかなり大量に備蓄しておく必要がある。このときに，プルトニウム濃度が高い MOX 使用済燃料は，きわめて効果的なプルトニウム供給源となるので，この観点からも軽水炉時代には再処理せずに備蓄しておくことが望ましい。その上さらにウラン燃料の使用済燃料も１万トン以上備蓄しておく必要がある[4]。

六ヶ所再処理工場の再処理能力は年間800トンで，年間の使用済燃料排出量を1,200トン(設備容量6,000万 kW の発電に相当)とした場合，毎年400トンの使用済燃料(一部 MOX 使用済燃料を含む)が残り，それらが中間貯蔵に回されることになる。しかし，その結果，40年間に蓄積する使用済燃料の量は，40年後に高速増殖炉への移行を開始するとした場合に必要とする備蓄量におおむね等しくなる。六ヶ所再処理工場の処理能力は，こうしたことを意図して決めたわけではなかろうが，将来的な高速増殖炉への移行を想定する場合には，結果的にきわめて適切な設定であったといえる。移行開始が遅れるとその分備蓄量が増えるが，その場合は新設する高速増殖炉の増殖比を備蓄量増加に応じて小さくすることで，プルトニウムの余剰をなくすことができる。

核燃料サイクル政策見直しにおける重要な視点：関係地元とのよき信頼・緊張関係の歴史的重み

2011年３月の事故以来の脱原発に向けての世論の高まりの中，現行の核燃料サイクル政策に対しても批判が高まっている。こうした中，原子力委員会では，同年９月に原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会(サイクル検討小委)を設置し，この問題に関する集中的な討議を重ねている。議論は５つの技術オプションの比較検討を中心に進められているが，争点の中心は，現行の再処理リサイクル政策を堅持するか否かである。

第１表に，議論の両極端である，再処理リサイクル方式堅持と直接処分方式への変更の比較を示す。⑴～⑸は数値的な比較が可能な項目であり，⑹以降は変更による社会的影響など数値での比較が難しい項目である。これらの比較項目の中で，直接処分が有利なのは経済性のみであり，それも発電原価にしてわずかに１円/kWh 前後の差でしかない。他の発電手段のコストの不確実性や揺れ幅がはるかに大きい中，政策決定上ほとんど議論に値しない差である。その一方，直接処分選択は，経済性以外の項目ではほとんどが不利になり，中でも，処分場立地への障壁増大や，青森県との信頼関係の破壊，日本各地における多数の使用済燃料中間貯蔵施設立地の必要性発生，などといった，原子力事業を推進する上で最も難しい社会合意に関連する大きなデメリットが目立つ。これらのデメリットは，民間の経営努力でだけで解決できるものではなく，政治による周到な取組と理解醸成のための長い時間を必要とし，対応のわずかな齟齬が政治的八方塞がり状態を生み出すリスクがきわめて高い。

現在の核燃料サイクルの諸スキームは，関係する地元との信頼構築に向けての長年にわたる様々な努力の上に成り立っている。立地にかかわる過去の諸活動には，現在のモラルスタンダードからすれば誉め難い事例があったことは否定しないが，それでも今日築かれている関係地元との信頼と緊張のよきバランス関係は，国民にとってかけがえのない歴史的財産である。サイクル検討小委の議論やその後の政策決定において，この問題が軽視されないことを望む。

もう一つの重要な視点：　増殖炉サイクル実現に向かう航海の最優先切符を，「人力車と自動車の経済性比較」で捨てるような愚行は避けよ

現行政策の維持にはもう一つの重要なメリットがある。それは，軽水炉時代における再処理リサイクルは，「高速増殖炉サイクルを実現する産業・社会インフラへのかけ橋」としての役割を果たせるということである。再処理という事業は技術的にも複雑であり，産業として定着させるためには，トラブルも含めて実業としての諸経験を積み重ね，その過程で遭遇する課題を一つ一つ乗り越えることで成熟する。現在，六ケ所再処理工場では，ガラス固化工程でのトラブルが続き，本格運転開始が大変遅れている。そうした状態には社会的批判が高まっているが，大局的に見ればこれも新技術を産業として定着させる上で通過しなければならない「陣痛」の過程といえる。高速増殖炉サイクル実現に向けては，国際的な保障措置との関係でもより調和的に事業を進める条件を育み，また日本社会全体としてより良く共存していける素地を育てていく必要がある。軽水炉時代に再処理リサイクル方式を取ることは，こうした社会的側面で求められる条件整備を実務経験の積み重ねで進めることができる。こうした経験の積み重ねは，高速増殖炉サイクル時代に必要とする技術的，社会的インフラの強固な基盤形成に役立ち，これも「金では買えない国民の財産」となる。わが国は主要先進国中エネルギー自給率が最も低いが，再処理事業を持ち，高速増殖炉サイクルの研究体制を有することで，「技術を資源とする恒久的巨大電力生産シ

第 1 表　2 つの選択肢の比較

比較項目	直接処分方式	再処理リサイクル方式
(1)発電原価(経済性)	1円/kWh 前後節約	1円/kWh 前後割高
(2)ウラン資源利用効率	約0.6%	約0.7%(1〜2割向上)
(3)50年分のサイクル廃棄物の処分場必要面積	高レベル廃棄物: 羽田空港敷地の1.5〜2.3倍(処分場立地の負担増大)	高レベル廃棄物: 羽田空港敷地程度 TRU廃棄物: 羽田空港敷地の1/10以下
(4)50年分のPu埋設量	600 トン ・恒久的保障措置適用 ・処分場住民合意の障壁増大	5 トン前後(濃度希薄)
(5)使用済燃料中間貯蔵施設	6万トン程度必要(むつ中間貯蔵施設20ヶ分) ・各地で新たな立地活動が必要	バッファーとして1万トン前後(3千トン分はむつで確保済み) (ガラス固化体貯蔵施設用敷地は六ヶ所に確保済み)
(6)高レベル廃棄物最終処分制度	処分制度要変更 ・法律の変更 ・新たな技術開発	変更不要
(7)立地地域との信頼関係	青森県との約束反故による国の信用失墜 ・現在再処理工場に保管中の使用済燃料の発生元への返還要求、むつの中間貯蔵計画の頓挫などのリスク	—
(8)再処理事業への投資の資本回収	不可能	可能
(9)核不拡散性	・Pu利用に伴う核拡散リスク回避 ・Pu鉱山問題による将来世代にの管理不能な核拡散リスクを残す可能性がある	・Pu利用に伴う核拡散リスク(保障措置の適用により管理可能なリスク) ・基本的にPuを現世代で利用するシステムであるため、Pu鉱山問題を生じず、将来世代に管理不能な核拡散リスクを残さない
(10)将来の増殖炉サイクルへの橋渡し	不可能(化石燃料消耗時向け保険の放棄) ・技術とインフラの断絶 ・再処理国としての地位放棄	可能(化石燃料消耗時向け保険維持)

ステム」実現に向かう航海の最優先切符を持っている。

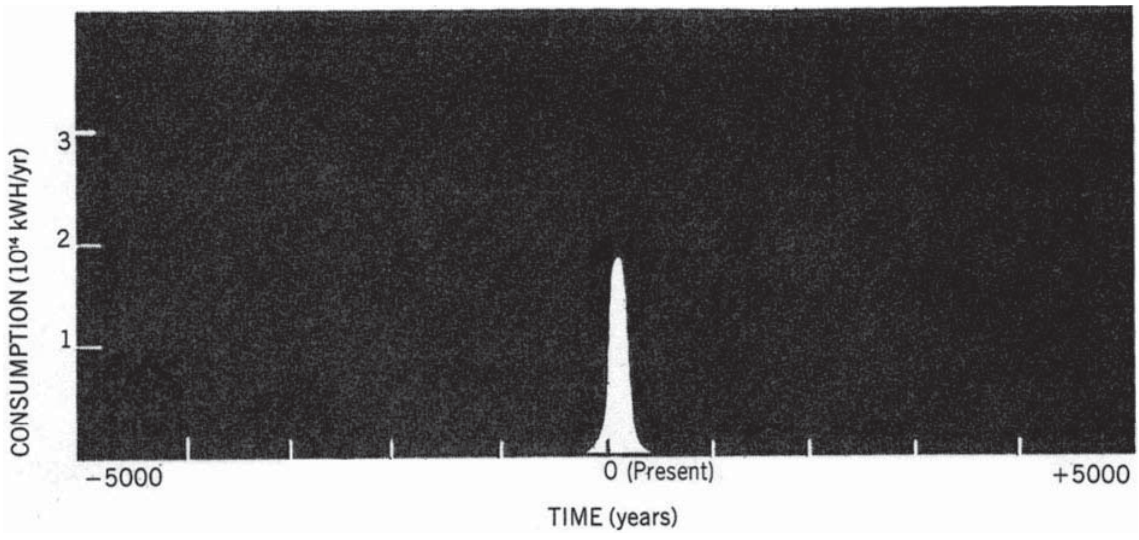
これまでたびたび軽水炉と高速増殖炉の経済性比較が行われ,「ウラン価格の上昇を考慮しても，当分軽水炉のほうが安い」との評価が下されている。しかしながら，前に述べたように，そもそも両者の機能や役割は全く異なるのであり，また期待される活躍時期も異なるので，経済性比較は，いわば「自動車は人力車より不経済」とするのと同様で全く意味をなさない。そうした無意味な比較を判定条件として高速増殖炉開発の継続可否を判断するのは，全く誤りである。サイクル検討小委における議論においては,そうした愚行はぜひ避けていただきたい。

長い夜の一本のマッチの輝き

長い人類史の中で，現代の我々はエネルギー消費の面で「極めて異常な過渡状態」の中に住んでいる。第 1 次オイルショックの後遺症が残る1976年，米国地質学研究所の M. King Hubbert は，第 3 図に示すように，人類が長い歴史の中のほんの数百年で化石燃料を使い尽くすデルタ関数状の曲線を示し，「長い夜の一本のマッチの輝き」と呼んだ[5]。石油資源の将来には既に陰りが見え始めている中，2 つの人口大国中国とインドの急速な経済成長が重なり，世界的なエネルギー争奪戦が始まっており，我々は，「マッチの輝き」が永遠でないことを実感として感じられる時代に入ってきている。

今日の大量の化石燃料消費は地球温暖化を招き，この問題からも人類は「省エネ」とエネルギー生産における「低炭素化」に向け待ったなしの対応を迫られている。こうした中,今後,新エネルギーを含む再生可能エネルギーの利用拡大が進むと期待されるが，枯渇に向かう化石エネルギーの全てを代替できるわけではない。エネルギーの問題をエネルギー安全保障の観点で見るときには，50年以上先への大局的な目配りも重要であり，その点から，特に基幹電源用大規模発電手段としての原子力の役割を決して軽視すべきではない。最近，シェールガスが大きな話題を呼んでおり，それはエネルギー業界に一時の安堵をもたらすかもしれないが，長期的に見れば枯渇への備えを怠ることは許されない。かつて,グリーンピースの元英国事務局長が「我々はもはや原子力を排除する贅沢は許されない」と発言したが，先進国でエネルギー自給率が最も低い日本はその最たる国といえる。

昨年の事故では，環境への大量放射能放出という最悪の事態に至ってしまったため，周辺地域の多くの住民が避難を余儀なくされ，いまだ帰還の目途は立っていない。そうした厳しい現実の中，巷間に脱原発の声が日増しに高まっている。しかし，我が国が原子力を「国策民営」の旗印の下に積極的に進めてきたのは，実務には民



The rise and fall of the world's rate of consumption of fossil-fuel resources is like the flame of one match in the long night—a delta function in the darkness.

第3図　長い夜の一本のマッチの輝き

の活力を利用するものの，国として，原子力が国家のエネルギー安全保障の要石の一つであることを強く認識していたからである。仮に我が国がその要石の一つを捨てるとすれば，それは，「ますます不安定化する化石燃料市場の荒波と資源争奪戦への防波堤を持たない生き方」を選択することであり，それはとりもなおさず，人口過密資源小国日本を支えてきた技術産業立国としての生き方を放棄することにつながる。将来の国民の安寧を考えれば，やはり原子力にエネルギー安全保障の要石としての一定の役割を残すことが，当然なされるべき決定であろう。その原子力を安定に利用し続けることを可能とする現実の施策として，再処理リサイクル方式の核燃料サイクルは堅持しなければならない。こうしたことは，この時期，民意尊重姿勢を示したい政府にとっては大変つらい決断になろう。その苦労を少しでも軽減するために，これまで原子力を進めてきた側は，事故の反省を踏まえ，原子力というシステムのトータルの安全性が，技術面と管理体制などを含むソフト面との両面から格段に向上できることを，国民に分かる形で示す必要があり，また，福島地方の環境修復への積極的関与により，影響域住民の早期生活再建に貢献しなければならない。これらがどこまで成し遂げられるかによって，社会の中につくった大きな傷がどこまで癒されるかが決まる。

いずれにしてもこの機会に日本のエネルギーの将来について，開かれた国民的議論が必要であるが，「長い夜の一本のマッチの輝き」を世界で最も注意深く見守らなければならない国民は日本人であることを忘れてはならない。

—参 考 文 献—

1) 森一久編，日本原子力産業会議発行「原子力は，いま日本の平和利用30年(上)，(下)」，中央公論事業出版，(1986)．
2) 核燃料サイクル問題研究会編，資源小国日本の挑戦 日米原子力交渉物語，日刊工業社，(1978)．
3) Blue Ribbon Commission on America's Nuclear Future, *Report to the Secretary of Energy*, (Jan. 2012)．
4) 河田東海夫，"軽水炉から高速炉への移行期にそなえて"，日本原子力学会誌，**49**[6]，410–415(2007)．
5) A. A. Bartlett, "Coal : no superabundance for US", *Phys, Today*, (Dec. 1976)．

著 者 紹 介

河田東海夫(かわた・とみお)
原子力発電環境整備機構
(専門分野)核燃料サイクル全般，バックエンド

特別企画　我が国の核燃料サイクル

今後の核燃料サイクルについて
コスト等から見た核燃料サイクル

京都大学 原子炉実験所　山名　元

Ⅰ．使用済核燃料の発生量の展望

福島第一原子力発電所の事故によって「安全リスク」について国民に大変な不安感を与えてしまった原子力発電であるが，本来の原子力発電は，①燃料供給国の安定性と輸入先の多様性，②燃料備蓄効果の高さ，③CO_2排出の少なさ，④燃料の海上輸送依存度の低さ，⑤経済性，などの特長により，エネルギー安全保障上の重要な役割を担う。今後，我が国の原子力依存度を当初想定より下げる必要があるとしても，エネルギー安全保障とCO_2排出削減に対する確実な方策として，原子力発電を，安全レベルを本質的に高めた上で一定の規模で利用していくことは，十分に想定できる。

一方，原子力発電を長期的かつ大規模に使うためには，条件として，核燃料の長期安定確保と（フロントエンド），発電に伴って発生する使用済核燃料の適切な管理（バックエンド）が必要となる。言い方を変えるなら，適切な原子力バックエンド管理が構築されなければ，原子力の長期安定利用は実現できないということであり，バックエンド管理の成否は，原子力そのものの生命線でもある。「一定規模の原子力の維持が中期から長期にわたって必要とされる可能性があること」，さらに「我が国では既に大量の使用済核燃料を発生させていること」の両面から，現実的な「最適なバックエンド管理方策の実現」に責任を持って取り組むことが重要である。

減原子力を含むエネルギーベストミックスの在り方についての審議が，政府において進んでいるが，原子力規模の様々な想定においてバックエンドの物量がどうなるかを見てみる。**第1図**は，いくつかの減原子力シナリオにおいて，どの程度の使用済核燃料が発生するかについて簡易評価した結果であり，その累積量を示している。⑴2010年のエネルギー基本計画（当初予定），⑵40年で原子炉を廃止するケース，⑶同じく45年のケース，⑷同じく60年のケース，⑸原子炉の設置年代によって寿命を40年～60年に変化させるケース，⑹40年で原子炉を廃止するが2030年頃を目途にリプレースを進めるケース（40 GWe 程度）の6つについて試算している。我が国では，1969年以降進めてきた原子力発電によって，現在，累積で約24,000トンの使用済燃料を発生させてきた。このうち7,100トンについては海外再処理を実施，1,100トンについては東海再処理工場にて再処理，残りの約14,000トンが原子力発電所内に，約3,000トンが六ヶ所再処理工場に保管されている。この試算は，年間の発生量を，古い炉の26トン/年間から，今後の高燃焼度化により16トン/年間まで変化させ，廃炉に伴う炉心燃料の発生も考慮に入れている。原子力発電規模をフェイズアウトさせるシナリオでは，そのペースが早いほど（原子炉寿命を短く設定するほど），累積発生量の増加のカーブが緩くなる。2050年時点で，⑵の40年寿命のケースでは約42,000トン程度，⑹のリプレースのケースでは50,000トンとなり，緩やかながらも増加を続ける。直接処分路線では，2050年以降に，この全量を地層処分することになる。

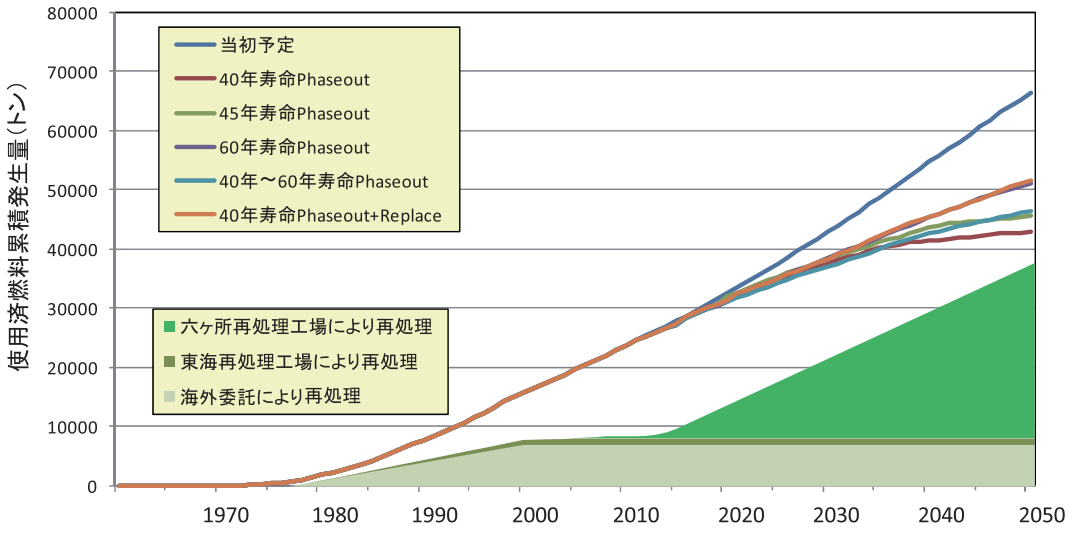
一方，六ヶ所再処理工場を稼働させる路線では，工場の40年の運転により約32,000トンが再処理され，回収されたプルトニウムは当面プルサーマルとして利用される。その後，限定MOXリサイクル路線（使用済MOX燃料を直接処分），高速増殖炉路線（軽水炉を高速炉に置き換える），核種分離変換路線（燃焼炉による積極的なマイナーアクチニドの燃焼）などのオプション路線に発展させてゆくことになる。再処理を行わない場合には，累積量から既処理量を引いた使用済核燃料に対して，中間貯蔵することが必要となる。六ヶ所再処理工場を動かさない場合には，2010年代の後半には，使用済核燃料貯蔵量が，原子力発電所内の管理貯蔵量である約20,000トンを超える可能性が高い。

Ⅱ．バックエンドのシナリオと判断

原子力バックエンド管理の考え方としては，基本的には，①再処理リサイクル，②直接処分，③長期貯蔵の3つしかないが，当面の現実解としては，これらの3つの基本オプションを組み合わせたいくつかのシナリオがあり得る。現在，原子力委員会の下で核燃料サイクル政策の検討を進めている“原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会（座長：鈴木達次郎原子力委員会委員長代理）”においては，長期貯蔵を除く，次の5つのシナリ

Direction of Future Fuel Cycle in Japan ; Fuel Cycle from the Perspective of Cost : Hajimu YAMANA.

（2012年　2月25日　受理）



第 1 図　種々の原子炉シナリオに沿った使用済核燃料の累積発生量

オ(政策選択肢)を，検討対象として取り上げている。

(a)　LWR ワンススルー
(b)　LWR-MOX 限定リサイクル
(c)　LWR-MOX 多重リサイクル
(d)　LWR-FR(アクチニド燃焼)
(e)　FBR(高速増殖炉)

バックエンドの路線を選ぶ上で重要となる条件や要件を，**第 1 表**に示す。上記の(a)～(e)のシナリオにおいて，資源利用効率，放射性廃棄物の量，放射性廃棄物の潜在毒性，核拡散に対する措置(保障措置および物理的防護)，中間貯蔵量，等の特性が異なってくる。各シナリオのコストや社会的条件などの違いは，現実的な実行可能性に大きく関わる条件である。

使用済核燃料の取扱いの視点は，基本的に，(1)使用済核燃料の資源価値の利用，(2)高レベル放射性廃棄物の管理の合理化の 2 つに集約されると言ってよい。(1)の「使用済核燃料の資源価値」の視点からは，使用済核燃料中に含まれるプルトニウムやウランの資源的な価値を評価した上で，将来的な核燃料資源の展望に基づいて，使用済核燃料をどのように扱うのかが問われる。(2)の「高レベル放射性廃棄物の管理の合理化」の視点からは，地層処分への負荷やそれに伴うリスク等が評価されねばならない。2 つの視点からの妥当性に加えて，コスト，核不拡散対応，社会的な問題への対処，技術の進捗度，安全性，などの種々の条件や，外的要件への整合が問われる。

「再処理リサイクル路線」の採用は，将来的な天然フィッサイル資源の見通しについて楽観せずに，使用済燃料中に残る資源物質(プルトニウムおよび残留 U-235 を 2 次フィッサイル資源と称する)の燃料としての価値を尊重するという判断に基づく。逆に，2 次フィッサイル資源の回収に余計なコストをかけずに，天然ウラン資源(1 次フィッサイル資源)への依存を楽観する場合には，直接処分を採用することになる。また，再処理リサイクル路線では，「使用済核燃料の全てを高レベル放射性廃棄物として廃棄しないこと」による，高レベル放射性廃棄物の条件緩和化の効果(廃棄体の体積や発熱量の低減，したがって処分面積の低減，早期の核分裂生成物核種の地層処分等)を狙うことが可能となる。

すなわち，再処理リサイクル路線を選択する場合は，将来的な天然ウラン資源の入手の不確実性(資源争奪や価格上昇)に対してかけるコストの妥当性が問われ，直

第 1 表　バックエンド戦略の基本的な要件など

前提となる条件等	
前提条件	原子力発電利用計画(規模・時期)
	発電所での使用済燃料保管量
	使用済燃料の中間貯蔵量
	プルトニウム保管量
	技術的進捗状況
	制度的整備状況
資源物質利用の視点	
資源利用	天然ウラン可採量
	天然ウラン価格
	天然ウラン外交
	天然ウラン獲得競合
	Pu-241の損耗
	資源節約効果
	海水ウラン利用実現性
核物質管理	核物質の転用抵抗性
	保障措置の実効性
	核拡散抵抗性
高レベル放射性廃棄物管理の視点	
使用済燃料保管	長期貯蔵の安全性
	世代間責任
	貯蔵施設立地の実現性
地層処分合理性	処分場面積
	長期安全性
	潜在毒性
	発熱密度
	廃棄体の品質管理
核種蓄積	長半減期高毒性核種の生成量
	核変換への可能性
必要とされる条件等	
必要条件・外部因子	コスト
	安全性
	技術継承
	対応の柔軟性
	安全保障
	国際関係・国際圧力
	社会受容

接処分を選択する場合には，2次フィッサイル資源の価値を放棄することによる資源的リスクが許容範囲であるという認識の妥当性が問われる。すなわち，天然ウラン資源確保に対する楽観的展望が前提であり，使用済核燃料を地層処分する上での負荷(処分面積の増加，中間貯蔵量の増加，地層処分時期の遅れ等)を許容することが必要である。この判断に対して，エネルギー事情などの国情や経済的な状況の違い等によって，各国の戦略に違いがあるというのも自然である。

Ⅲ．フィッサイル資源の“資源価値[a]

使用済核燃料から回収されるプルトニウムとウランの持つ“資源価値(Importance)”に対する認識が重要である。天然ウランが豊富に供給される状態では，使用済核燃料中の資源(2次フィッサイル資源)の相対的な価値は低くなるが，天然ウランの入手価格が上昇したり，資源制約によってその入手が難しくなると，2次フィッサイル資源の価値は相対的に高くなる。以下に，2次フィッサイル資源の経済的な価値と量的な価値について考える。

1．回収資源のクレジット

原子力発電コストは，発電プラントの建設費や維持費に，天然ウラン費用，濃縮役務費用，再処理費用，処分費用等を合計したものであるが，回収したプルトニウムや回収ウランに買取価格があればその価格をマイナスすることができる(プルトニウムクレジット，回収ウランクレジット)とされていた。このためには，取引市場等が存在しており正のプルトニウムクレジットが確定している必要があるが，現在は，プルトニウムを取り引する市場は存在しないので，プルトニウムクレジットを明確に確定することは難しい。このことは，昨今の燃料サイクルコスト計算において，プルトニウムクレジットを明確に扱うことはせず，発生したプルトニウムを自ら使うサイクル事業としてのコストを評価していることの理由の一つになっている。

原子力委員会下で行われた核燃料サイクルコスト評価の中では，MOX燃料単価(割引率3％)41,500万円/tHMは，ウラン燃料単価27,100万円/t(50＄/lbU_3O_8と低い天然ウラン価格に基づく)を大きく超えており，プルトニウムクレジットは負となる。プルトニウムクレジットが正になるためには，天然ウラン価格が約110＄/lbU_3O_8を超える必要があるが，これは，ボストン・コンサルティング・グループ(BCG)報告に載る160＄/kgU(－24＄/gPufに相当)やマサチューセッツ工科大学(MIT)報告の15,743 kg/lbU_3O_8(－24＄/gPuf)と，範囲として一致するとしている[1)]。なお，この計算は，再処理コストを所与のものとしており，燃料費だけでのウラン燃料とMOX燃料のバランスをとったものである点に注意が必要である。

同様に，回収ウランクレジットについては，天然ウランを濃縮して得る燃料の取得原価と，回収ウランを再濃縮する場合の燃料取得原価とを比較(炉心装荷時点換算)して得られる。回収ウランを利用するための費用(転換，濃縮，加工単価)は，天然ウランを利用する場合より高くなると想定されるが，仮に，回収ウラン利用に天然ウランの1.5倍の費用がかかるとしても，ウラン価格30＄/lbU_3O_8において，ウラン燃料原価と回収ウラン燃料原価は等しくなる。現在，天然ウラン価格は50＄/lbU_3O_8近辺であるので，既に，回収ウランクレジットは正の範囲にあると見ることができる[1)]。

なお，“資源価値”という言葉は，そのエネルギー安全保障上の意義，廃棄物管理としての意味，戦略物質としての意味等，外部経済的な広い意味を含むポテンシャルを意味していることに注意が必要である。一方，上記のクレジットは，市場経済による価格が明白なウラン燃料との対比による価格の側面をあえて表したものであり，本来の“資源価値”を正確に表しているわけではない。

2．回収資源の量的な側面

天然ウラン資源と2次フィッサイル資源の相対的な価値を理解する上で，両者の量的なバランスを理解することが必要である。この観点から，天然ウラン資源の生産量や資源量に比して，すでに発生した使用済核燃料や今後発生する核燃料中に含まれる2次フィッサイル資源の量が，どの程度の量的な関係にあるかを知ることは重要である。**第2表**は，AREVA社が公表している，「過去に世界で採掘されたウラン資源の行き先」を示す[2)]。すなわち，2000年までに世界中で採掘された天然ウラン中のU-235がどのように使われたかを，天然ウラン量に換算して表したものである。2000年までに採掘された世界の累積生産量は約2,300 ktであるが，そのうち635 kt分は採掘に伴う廃棄物に移行して回収不能になっている。濃縮ウランとして250 ktがストックされており，455 kt分

第2表　過去に生産されたフィッサイルウランの行き先(天然ウラン量に換算)[2)]

	天然ウラン換算量(kt)	相対値
総生産量	2350	
商用ストック	70	3%
FC pipeline & strategic	65	3%
高濃縮ウランストック	250	11%
劣化ウラン(0.1%)	455	19%
回収ウラン	230	10%
ロス・廃棄物	635	27%
核分裂	635	27%
プルトニウム	250	11%

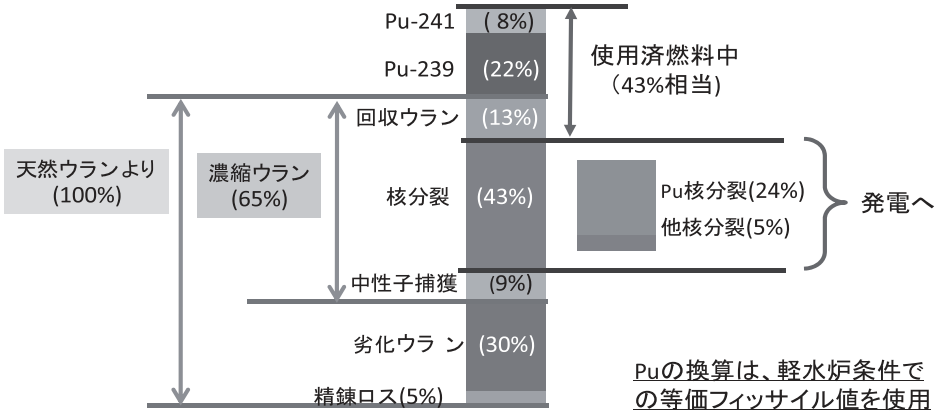
[a] ここでいう“資源価値(Importance)”とは，金銭的な価値を意味するのではなく，その物質が有する様々な効果やポテンシャルなどの総合的な価値をいう。

が劣化ウランとして保管されている(同位体品位は低下)。核燃料として生産されたもののうち，実際に核分裂したのは635 kt 分に過ぎないことは驚きである。一方で，使用済核燃料中に残留している核分裂性プルトニウムは，天然ウランに換算すると約250 kt 程度に相当する。また，使用済核燃料の中に残留しているウランは230 kt の天然ウランに相当する。すなわち，過去に採掘されたウランの総量のうち，発電に使われたウランは約27%だけであるのに対して，使用済核燃料や劣化ウランには合計約40%相当分が残っていることになる。

2 次フィッサイル資源や劣化ウランは，量としては多いが，資源の品位としては低いことに注意が必要である。すなわち，劣化ウランについては同位体の品位が低いため再濃縮コストが必要であり，使用済核燃料中のプルトニウムや残留 U-235については，再処理コストや回収ウランの再濃縮のコストがかかる。2 次フィッサイル資源は，言わば，「量的には大きいが，再利用にコストのかかるフィッサイル資源」とでもいうべきものである。また，2 次フィッサイル資源の全てを利用できるわけではないことにも注意が必要である。軽水炉での MOX 利用では，核分裂させ得るプルトニウムは約70%程度に留まり，回収ウラン利用では，再濃縮により燃料として利用できるのは80%程度に留まる。1 次フィッサイル資源(天然ウラン)や濃縮役務の価格が，2 次フィッサイル資源の再利用に要するコスト(再処理および加工)を超えるまでは，2 次フィッサイル資源利用の経済的な意義は低く留まる。後述するように，軽水炉での MOX 利用においては，この経済的な意義が妥当化されることは非常に難しく，経済的な意義は，ウラン価格が高騰した条件において安価な高速増殖炉を実現によってこそ妥当化される。

なお，世界の天然ウラン資源については，OECD によるレッドブックによると，130 $/lb 以下で採掘可能なウラン確認資源量は約540万トンと考えられているので，上記の2000年までの累積 2 次フィッサイル資源量は，その約 2 割程度の位置づけにあると言える。2 次フィッサイル資源の再利用可能量として半分程度を想定すれば，約 1 割程度の位置づけにあると言える。現在，世界では，過去のウランのストックや解体核兵器材料が供給されることで，年間約 7 万トンの需要に対して，年間約 4 万トンの生産量で，需給がバランスしている。今後の世界的な原子力利用の拡大に沿ってウラン需要が増加しても新規鉱山の開発が追従しない場合には，価格上昇に至る可能性は否定できない。2 次フィッサイル資源は，このような事態に対する，一種のストックとしての意味を持つのではないか。

2 次フィッサイル資源の位置づけを理解するために，**第 2 図**により，天然ウランとして採取された U-235が，軽水炉燃料においてどのように消費されるかを概念的に示す。第 2 図は，PWR 燃料(燃焼度45,000 MWd/t)を想定し，ORIGEN-II により計算したものである。採掘される U-235のうち，濃縮ウラン燃料となるのは65%に留まる。濃縮ウラン燃料の炉内滞在中に，このうちの43%分が核分裂し，9 %分が中性子捕獲により失われ，13%分が使用済燃料中に残留する。一方，U-235換算で29%に相当するプルトニウム及び MA 核種が，炉内で生成しつつ核分裂して発電に寄与している。プルトニウムについては，30%(Pu-239が22%，Pu-241が 8 %)相当分が，使用済燃料中に残留する。結果的に，採掘したフィッサイル量の65%が燃料として装荷され，そのうちの43%が核分裂して利用される結果，約43%に相当するフィッサイル資源(Pu-fissile/U-235＝30 : 13)が燃料に残留するということである。残留分の30%を占める核分裂性プルトニウムを回収して，MOX 燃料として軽水炉で 1 回利用すれば(限定 MOX リサイクル)，その 7 割近くを燃焼利用できると期待される。また，高速増殖炉に利用すれば，多重リサイクルによりそのポテンシャルをほとんど利用できると期待される。回収ウランについては，再濃縮により，残留している U-235の約 8 割程度を濃縮ウラン燃料として加工でき，第 2 図のスキムに従って再び有効利用できる。



第 2 図　軽水炉燃料でのフィッサイル物質の消費バランス

Ⅲ．軽水炉核燃料サイクルのコスト

2次フィッサイル資源を回収するためのコスト(再処理，MOX加工，回収ウラン再濃縮)が問題となる。軽水炉バックエンドに関わる再処理コスト及びMOX燃料加工コストについては，かつては，想定値が用いられたが，現在では，六ヶ所再処理工場や高レベル放射性廃棄物処分等の，既に現実化している事業での実際の費用を用いて評価できる。

原子力委員会・原子力発電核燃料サイクル技術等技術検討小委員会において核燃料サイクルコストの再評価が行われた[1]。この作業は，国家戦略室による原子力や火力発電等の全ての電源のコスト比較評価のために[3]，原子力委員会が再評価を実施したものである。発電コストの試算は，2010年時点でのモデルプラント(120万kW)をベースにしたもので，核燃料サイクルについても同様の設定をしている。主要な計算の前提および条件は，プラント規模：120万kW，ウラン濃縮度：BWR 3.8%およびPWR 4.1%，燃焼度：ウラン燃料45,000 MWd/t及びMOX燃料40,000 MWd/t,発電設備熱効率:34.5%である。設備利用率や割引率については，幅を持たせて設定された[1]。

燃料サイクルコスト評価は，①再処理モデル，②直接処分モデル，③現状モデルの3つのケースについて実施された。①再処理モデルは，理想的な軽水炉ベースの核燃料リサイクルのモデルであり，使用済み核燃料は発生の3年後に再処理・MOX燃料加工されとして軽水炉に繰り返しリサイクルされる。②直接処分モデルでは，炉装荷時点を起点にして50年までは使用済核燃料が中間貯蔵されてその後，直接処分される。③現状モデルは，発生量の半分を再処理リサイクルし，残りの半分を50年間中間貯蔵した後に再処理リサイクルする。六ヶ所再処理工場においておおよそ半量を再処理リサイクルして残りを中間貯蔵する現状の路線は，この現状モデルに近い。

第3表　核燃料サイクルの単価(割引率3%)

事業	単価(万円/tHM)
ウラン燃料	27,100
MOX燃料	41,500
再処理等	41,100
SF輸送(発電所—再処理)	1,700
SF輸送(発電所—中間貯蔵)	1,600
中間貯蔵	5,200
高レベル放射性廃棄物処分	11,000
SF輸送(中間貯蔵—直接処分場)	1,600
直接処分(最小値)	17,400
直接処分(最大値)	20,100

コスト算定に使われた各工程の単価(割引率3%のケースを抜粋)を，**第3表**に示す。ウラン燃料価格については，2008年から2010年の調達実績に基づいて設定されている。MOX燃料単価については，最新の事業費の増加を反映したものになっている。再処理単価については，法律に基づいて国が算定している値が使われている。その他の項目についても,最新の値が使われている。

第4表に,燃料サイクルコストの評価結果(割引率3%のケースを抜粋，平成16年評価の結果を対比して表示。小委員会報告より作成。)を示す。この結果を見ると，燃料サイクルコストの合計は，直接処分モデルが1.00～1.02円/kWhと最も低く，現状モデルが1.39円/kWh，再処理モデルが1.98円/kWhと順に高い。現状モデルは，現在の燃料サイクルの状況に近いものであるが，直接処分モデルよりも0.37～0.39円/kWh高い結果となっている。その差の大部分は，再処理コストが大きいことによる(現状モデルで0.46円/kWh，再処理モデルで0.73円/kWh)。地層処分のコストについては，再処理の2つのモデルでのガラス固化体の処分が0.04および0.08円/kWhであるのに対して，直接処分では0.10～0.11とや

第4表　核燃料サイクルコストの評価結果(単位：円/kWh)(割引率3%)

バックエンド型式		全再処理	直接処分		部分再処理	
評価		今回	今回	H16年評価	今回	H16年評価
		再処理モデル	直接処分モデル	直接処分	現状モデル	再処理
燃料サイクル	ウラン燃料	0.73	0.81	0.64	0.77	0.59
	MOX燃料	0.15	–	–	0.07	0.07
	フロントエンド計	0.88	0.81	0.64	0.84	0.66
	再処理等	1.03	–	–	0.46	0.65
	中間貯蔵	–	0.09	0.12	0.05	0.04
	高レベル廃棄物処分	0.08	–	–	0.04	0.12
	直接処分	–	0.10–0.11	0.12–0.21	–	–
	バックエンド計	1.11	0.19–0.21	0.24–0.33	0.55	0.81
	燃料サイクル合計	1.98	1.00–1.02	0.9–1.0	1.39	1.47
原子炉	政策経費	1.10			1.10	
	事故対応コスト	0.50			0.50	
	資本費	2.20			2.20	
	追加的安全対策費	0.20			0.20	
	運転維持費	2.80			2.80	
	原子炉合計	6.80			6.80	

や高いものの，大きな差ではない。これは，平成16年に行われた評価と比べると，直接処分での処分体の埋設手法が合理化されており(地下坑道における，処分体の水平運搬が可能となったこと)，直接処分コストが平成16年評価よりも低くなっているためである。平成16年の評価と今回の評価での燃料サイクルコストを比較すると，天然ウラン価格の上昇によりフロントエンドコストが0.2〜0.3円/kWh 上昇したが，バックエンドについては再処理コストがやや下がったことから，直接処分シナリオはやや上昇し，現状モデルはやや下がったという結果になる。

再処理モデルでの再処理価格や MOX 燃料価格の変動に対する感度を知るために，再処理および MOX 燃料の単価を1.5倍に上げた計算も行われた。再処理単価1.5倍とは，現在の六ヶ所再処理工場が総費用11.7兆円で3.2万トンの処理を想定しているのに対して，事業費用が3兆円増加し，処理量が2.7万トンに留まるとした場合を想定している。再処理および MOX 燃料単価が1.5倍に上昇した場合，現状モデルの燃料サイクルコストである1.39円/kWh(割引率３％の場合)が，1.64円/kWh に上昇すると算出された。天然ウラン価格の上昇を想定して，ウラン精鉱要素の単価を２倍にした場合についても評価された。これにより，燃料サイクルコストが，再処理モデルおよび現行モデルでは1.2倍に増加，直接処分モデルでは1.3〜1.4倍に増加した。直接処分モデルの方が天然ウラン価格の上昇に対してやや大きな影響を受けることが分かる。

高速増殖炉燃料サイクルのコストについては，今回の評価では扱っていない。高速増殖炉サイクルは開発中であるため，日本原子力研究開発機構による実用化高速増殖炉の戦略調査研究の評価結果を参考とする[4]。実用化高速増殖炉は，将来の軽水炉の発電単価を0.36円/kWhと想定して，これ以下のコストを達成することを目標としている。Na 冷却高速炉と簡素化 MOX ペレット燃料の組合せによる高速炉サイクルの発電単価の内訳は，資本費(34%)/維持費(37%)/燃料費(29%)である。現行モデルの軽水炉発電コストの構成である，資本費(36%)/維持費(43%)/燃料費(21%)と比べると，燃料費の相対的割合が増えているのが特徴である。

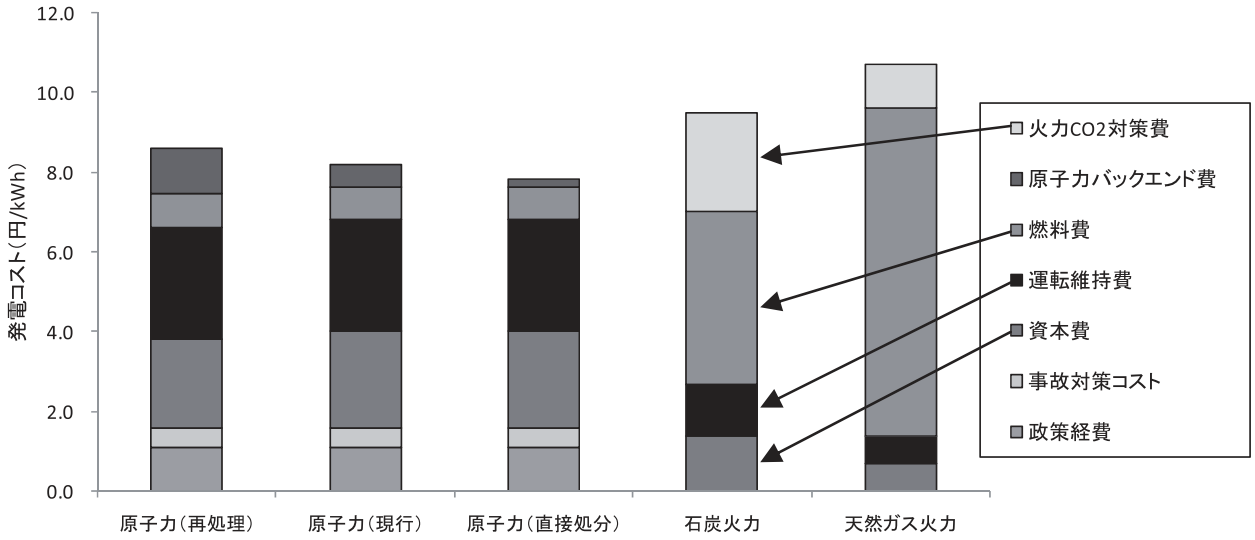
Ⅳ．今後の核燃料サイクル戦略

核燃料サイクル政策についての議論の混乱には，原子力バックエンド管理戦略の複雑さが十分に理解されていないことが背景にある。核燃料サイクル戦略の策定には，資源物質管理と放射性廃棄物管理の２つの側面から，どの程度のコストをかけることで原子力利用を長期的に安定化できるかというバランス的な視点が重要である。かつての懸念であった資源枯渇やエネルギー需要急増は，現在の状況では極めて考え難く，むしろ今は，持続的な非化石エネルギー源としての原子力の役割を維持するための確実なバックエンド戦略が求められている。２次フィッサイル資源の“資源価値”を，継続的な原子力利用の展望に沿ってどの程度に見るかが問われる。結局，将来のウラン資源価格やウランの入手可能性に対するリスク分析の判断の認識が必要である。

“資源の有効利用”は核燃料サイクルの本来的な意義であるが，使用済核燃料や劣化ウランに含まれる２次フィッサイル資源の量は，エネルギー資源を持たない日本にとって決して疎かにはできない規模である。また，高レベル放射性廃棄物の管理の観点からは，直接処分よりも再処理のガラス固化体の処分の方が容易であることが確かである。安全性や核不拡散性などの事業の前提となる要件については，適切な設計体対応や制度的対応を取ることにより，両者に大きな差が発生することはないと考えられ，それを理由に路線選択することは考えにくい。重要なのは，天然ウランの今後の供給の長期展望の中で，「２次フィッサイル資源のリサイクルにかけるコストが，どの程度であれば妥当な範囲であるか」という問いへの判断である。

今回のコスト検証によって，再処理方式(多重 MOX リサイクル，限定 MOX リサイクル)の方が直接処分方式よりも，0.4円/kWh 程度高いことが明確になったが，MOX リサイクル方式では約80%の燃料を濃縮ウラン燃料に依存することから，天然ウラン価格が上昇しても，MOX リサイクルと直接処分サイクルでの発電コストの差は大きくは縮まらない。したがって，0.4円/kWh の差は，軽水炉での MOX リサイクル方式を続ける限りは，当面は解消できない。軽水炉での MOX リサイクル方式は，プルトニウム利用による経済的効果を直接狙うものでないのは確かで，むしろ，再処理を行うことによって２次フィッサイル資源を利用可能な状態に保持しておくための暫定的な手法であるといった方がよい。すなわち，軽水炉での MOX リサイクル方式は，一定の許容範囲の負担によって２次フィッサイル資源の“資源価値”を確保しておくための当面の方策である。これに対して，高速増殖炉サイクルは，天然ウラン資源に全く依存しないため，天然ウラン価格が高騰し軽水炉発電コストが許容できないくらい上昇する将来において，軽水炉にとって代わる意義は大きい。

以上のように，当面，0.4円/kWh 程度のお金をかけて MOX リサイクル方式を続けることで，天然ウラン価格の高騰の時代に速やかに高速増殖炉に移行できるような技術や制度の基盤を固めておくことには，一定の合理性があるのではないか。また，再処理を進めることによって，早期の地層処分実施を含む放射性廃棄物管理の合理化を図るという放射性廃棄物管理上の意義は重要なのではないか。一方で，直接処分を想定した中間貯蔵施設での長期の貯蔵に関しては，社会合意の獲得を含めての準



第 3 図　原子力発電コストと火力発電コスト（文献 3 ）より作成）

備不足や不確定性が存在することを，現実的な条件として無視すべきではない。

原子力の核燃料サイクル路線の判断は，軽水炉発電における，直接処分とリサイクルの比較としてだけではなく，火力発電を含んだ発電系の中で行われるべきである。**第 3 図**に，今回評価された原子力発電コストと火力発電コストを対比して示す。石炭火力発電や LNG 火力発電では，コストの大半が燃料費用であり，将来，これらの化石資源の入手価格が上昇する場合，発電コストに大きく影響を与える。これに対して，原子力発電での燃料費の割合は小さく，濃縮ウラン燃料の価格上昇の影響は大きくは影響しない。現状路線の再処理費用は直接処分に対して0.4円/kWh 高いが，減原子力により割高な火力発電が優位となるベストミックスの中で，この差が全発電系へ致命的な影響を与えるとは考えにくい。むしろ，将来の化石資源や天然ウラン価格の高騰のリスクへの認識，使用済核燃料の貯蔵量の削減等の観点，将来的な核種変換への可能性を残すという視点から，0.4円/kWh の負担により既定路線の再処理路線を継続しながら高速増殖炉の技術を整備する体制を維持する路線が妥当化される余地は，十分にあるのではないか。

—参 考 文 献—

1）原子力発電・核燃料サイクル技術検討小委員会資料集 1，原子力委員会，(2011.11)．
2）“Primary and secondary sources in Global Nuclear Fuel Supply ; focus on Uranium”，Seminar on Global Nuclear Fuel Supply, Permanent Mission of Japan to the IAEA, January 26, 2009.
3）コスト等検証委員会報告書，エネルギー・環境会議 コスト等検証委員会，(2011.12)．
4）高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究フェーズⅡ技術検討書，⑶総合評価，FBR サイクル統括ユニットエネルギー評価グループ，JAEA-Research　2006-044，(2006)．

著 者 紹 介

山名　元（やまな・はじむ）
京都大学 原子炉実験所
（専門分野/関心分野）アクチニド化学，再処理工学

解説

津波対策評価ガイドラインの策定
福島第一原子力発電所の事故後の対策を受けて

東北大学　橋爪 秀利

福島第一原子力発電所の大事故により，想定外の大津波に対する原子力発電所の安全性に対しての疑問が生じた。そこで，NPO 法人日本保全学会内に組織された，「津波対策評価ガイドライン検討会」において，我が国の軽水型原子力発電所が津波に対してどの程度の対応力を備えているかを評価するためのガイドラインを策定し，さらに，軽水型原子力発電所(東京電力を除く37基の発電所)の津波に対する安全性の評価を実施した。本報では，ガイドライン策定の背景，内容，評価結果について解説し，今後の活動についても簡単に述べる。

Ⅰ．はじめに

2011年 3 月11日の「東日本大震災」の発生から，ほぼ 1 年が過ぎようとしている。当初の想定値をはるかに上回る津波の来襲により福島第一原子力発電所の大事故が発生し，数十万テラベクレルの放射性物質を放出した。一旦大事故が起きれば急性白血病などで多くの人が命を落とすというようなことは全くの杞憂であったが，多くの近隣住民の方々に避難生活を強いており，環境に放出された放射性物質の除去作業がようやく途に着いた状況である。今後の帰還の見通しは，まだまだ不明な状況であり，原子力発電所の事故による社会的な影響は非常に大きいことを改めて認識しなければならない。

一方，事故後，原子力安全・保安院から各電力事業者に対して，短期的・中長期的な津波対策の実施を求める指示が出され，各事業者は対応できる部分から対策に取り組んできていた。原子力発電所の大事故が与える社会的影響を鑑みれば，設計基準をはるかに上回る津波が来襲した場合，福島第一原子力発電所のような大事故に再度陥るのか，あるいは，この津波対策が有効であり，このような大事故には至らないと言えるのかどうかを客観的に判断する必要性がある。さらに，このことを地域の方々に分かりやすく説明することが原子力発電所に対する不信感の払拭には不可欠であるとの考えから，日本保全学会内に「津波対策評価ガイドライン検討会」が組織された。

この委員会は，2011年 5 月27日から 7 月 8 日まで，毎週 1 回の計 7 回の検討会と，6 回の幹事会，つまり合計13回が集中的に開催され，この委員会において我が国の軽水型原子力発電所が津波に対してどの程度の対応力を備えているかを評価するための「津波対策評価ガイドライン(ver.1)」[1]が策定され，さらに，軽水型原子力発電所(東京電力を除く37基の発電所)の津波に対する安全性の評価が実施された。折しも，このガイドラインが委員会で認められ，軽水型原子力発電所の評価が終わる直前に，政府からストレステストの実施が発表され，このため，ガイドラインに基づいた評価結果の公表は，評価の基礎データの再確認を実施するための時間的余裕がないため，一部を除き，ストレステスト終了後に行うこととなった。

本報では，ガイドライン策定の背景，内容，評価結果について解説し，今後の活動についても簡単に述べる。なお，このガイドライン自体は，英訳版とともにすでに印刷物となっており，公表されている(http : //www.jsm.or.jp/jsm/)。

Ⅱ．ガイドラインの概要

1．目的と考え方

津波の来襲により，現状の軽水型原子力発電所に発生・進展しうる事象を整理した上で，発電所が想定を大幅に上回る津波に対しても，十分に対応できる備えを持っており，安定的な冷却機能へ移行できる能力を備えているか否かを評価できる方法・手順を明確化し，我が国で運転開始後の軽水型原子力発電所の津波対策が原子炉及び使用済燃料プールの安定的な冷却状態(崩壊熱を発生する燃料が冷却水に安定的に冠水した状態で維持されている状態)を達成し，それを維持する方策として妥当であるかどうかを判断するための評価方法を示すことを目的としている。そこで，以下の(1)〜(4)に示すような基本的な考え方に基づいて評価を行う。

Development of Guideline for Assessing Large Tsunami Countermeasures : Hidetoshi HASHIZUME.
(2012年　2 月17日　受理)

⑴　地震後の津波が来襲し，外部電源が喪失することを想定し，その際の原子炉の安定的な冷却状態を確保するための方策が多層化され，それらが多様化されていることを評価する。その際には，津波の到達する範囲の拡大に対応してその各段階での対策が整備されていること(空間的評価)と，津波に起因して発生する事象の進展に対応してその各段階で対策が整備されていること(時間的評価)を評価する。
⑵　津波高さを限定せずに設計基準事象を超える事象(過酷事象)を想定した検討を基本とする。
⑶　各原子力発電所が整備している津波対策が実効性のあるものであることを確認するため，津波対策の実施訓練も評価に含める。
⑷　津波対策として今後得られる最新の考え方や設備の導入が阻害されることがないように配慮する。

運転開始後の軽水型原子力発電所に，地震による津波が来襲した後の，原子炉と燃料プールが安定的に冷却可能であるかどうかを評価するために，特に重要なシステムである電源と崩壊熱ヒートシンクの確保の観点から，津波対応設備の状況と想定している内容を評価対象としている。

2. 評価方法

津波対策は燃料の冠水および安定的な冷却状態を確保するため，大津波発生の警報等を受け，津波監視と機材の手配などの準備を進め，津波襲来後の被害確認と本設/可搬式設備による対応に基づいた安定的な冷却状態への移行が可能かどうかを評価する。

まず，各発電所で設定している津波の高さを第一段階の津波の高さとし，さらに，プラントごとに，施設高さおよび施設防水性に基づいて，電源/ヒートシンクの使用可否を左右する津波の高さを段階的に設定し，津波対策の妥当性を,安定的な冷却が可能な条件(電源・ヒートシンク・注水設備等)が確保されているか，計装や監視設備等の手段があるか，といったような視点から評価する。さらに，深層防護の考え方を導入した検討方法を導入し，津波の到達する範囲の拡大に対応してその各段階で対策を評価する空間軸に沿った検討と，津波に起因して発生する事象の進展に対応してその各段階で対策を評価する時間軸に沿った検討を実施し，津波来襲以降の事象の進展および津波到達範囲の拡大を想定して評価する。具体的には

⑴　空間軸に沿った評価として，取水口・敷地・建屋といった発電所における施設への津波到達範囲の順次拡大時の評価
⑵　時間軸に沿った評価として，地震発生・津波来襲・電源喪失・ヒートシンク喪失・炉心損傷へといった事象の進展に沿った評価
⑶　本設の対策設備・動力源・水源の有無，およびそれによる対応可能時間と次の冷却手段への引き継ぎ手順の明確さの評価
⑷　本設設備の代替となる可搬式設備確保の評価
⑸　各段階における防水等の各種対策の有無および訓練などによる実効性の確認がなされているかどうかのチェックリストによる評価

を行う。詳細な項目については，ガイドラインを参照して頂きたい。

3. 欧州ストレステストとの相違点

欧州のストレステスト[2)]では，大事故の起因事象として地震と洪水を想定しており，特に，洪水に関してはレベルの選定理由を求めているが，津波の場合には津波高さと来襲回数を今回の地震から得られる知見を反映して評価することが時間的に困難であるため，段階的に高くすることとしている。また，欧州ストレステストでは，わずかな変動が危機的な事態を招くような事象(クリフエッジ)を特定し，この影響を防止する対策あるいはプラントの頑強性を強化する対策を示すことを求めている。なお,外部電源の喪失は数日程度を想定しているが，本ガイドラインでの評価の際には，復旧までの時間は特に定めず，外部電源がない状態での事象の進展を評価している。

日本の原子力発電所にこのストレステストを当てはめるとすれば，津波に対する短期対策以前の状態での評価を行い，クリフエッジを抽出し，その対策を講じるという順番になるが，すでに短期対策を講じているため，対策後の結果を含めて評価することになる。

Ⅲ. 評価結果

前章で述べたように，本ガイドラインは，津波高さを順次変化させ，津波に対する耐性評価を行うことを一般的な目的として制定されているが，今回は，福島第一原子力発電所の事故を踏まえて津波高さを約10～15 m と想定し，津波に対する短期対策以前と対策後の原子力発電所の評価を実施した結果について簡単にまとめる。なお，評価においては，機器や施設に対する防水性を考慮し，防水性が維持できる津波高さまでは機器が使用可能であり,その高さを超えた場合には使用不可としており，機器等の配置場所による浸水までの時間的裕度や侵入水量に基づいた浸水の回避可能性などは考慮していない。

また，淡水注入可能時間は，S クラスの機器内にある淡水量から計算し，電源車からのつなぎ込み時間は訓練の実績を基に評価している。

空間軸に沿った検討結果の例の一部を**第 1 表**に示す。ここでは，電源に関して，津波高さの違いによる使用可能性について評価しており，10.7 m の高さの津波で全交流電源喪失状態(SBO)になり，15.7 m の津波高さで全電源喪失状態(TBO)に至ることが明らかである。

第 1 表　津波到達範囲と対応策の検討例

対象	系統	主要機器など	津波の高さ		
			5．7m （審査時想定）	10．7m （想定＋5m）	15．7m （想定＋10m）
電源系	1）非常用DG	発電機（設置場所・水密性等）	◎	◎	×
		熱交換システム（海水ポンプ・空冷場所）	◎	×	×
		その他（電源盤・ケーブル等周辺機器）	—	—	×（ケーブル冠水）
		使用可否	○	×	×
		容量	1800KVA	0	0
		稼働時間	1週間	0	0
		復旧までの予想時間	—	1週間	∞
	2）直流電源 （バッテリー）	本体	◎	◎	×（冠水）
		容量	1200AH	1200AH	0
		使用可能時間	14時間	14時間	0
	3）可搬式 電源	本体（待機場所の標高・アクセス性）	◎	◎	◎
		津波監視体制	◎	◎	×（監視システム冠水）
		供給までの時間（地震・津波、余震の影響）	3時間	3時間	1週間
		容量	1500KVA	1500KVA	1500KVA
		稼働時間	200日	200日	200日
	4）予備電源 （余震の津波対策）	配備の有無	未配備	未配備	未配備
		再配備までの予定時間	評価不能	評価不能	評価不能

（注）　◎：使用可能，×：使用期待できず（不可），—：稼動可能状態，∞：復旧期待できず（使用不可）

1. 短期対策以前の評価

短期対策以前では，想定外の津波の来襲の結果，非常用ディーゼル発電機が使用不可能となり，直流バッテリーが切れた段階で炉心損傷が始まると評価された。この結果は，どの原子力発電所においても同様であり，大津波に対する以前の原子力発電所の脆弱性を露呈していると言える。福島第一原子力発電所の 1 号機・2 号機では，この直流バッテリーも津波で使用不可となったため，非常に早い段階で炉心損傷が発生したものと考えられる。

2. 短期対策後の評価

典型的な例として，**第 1 図**に地震発生後の津波に来襲された BWR 原子力発電所の時間軸に沿った評価結果を示す。図より明らかなように，短期対策を実施したことにより原子炉の安定的冷却が可能となっていることが分かる。実際の原子力発電所の評価もほぼ同様な結果となっている（評価は終了。数値等の最終チェックが終わり次第，随時公表予定）。

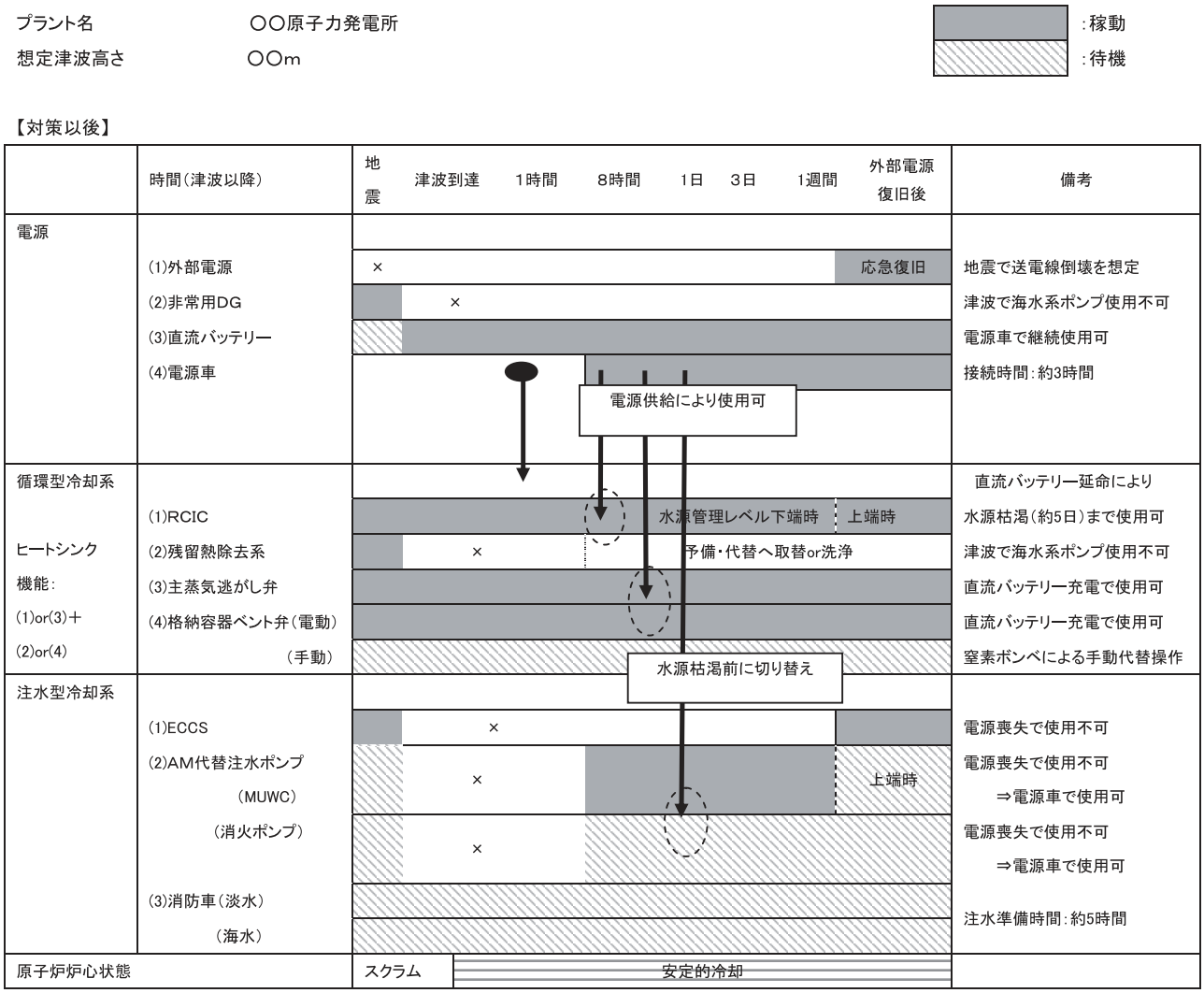
また，原子力安全・保安院の短期対策以前であればプラントごとに津波に対する裕度の差はあったと考えられるが，短期対策実施後のクリフエッジ事象は，おおむね以下のようにまとめられる。

⑴　津波の高さが，「沿岸部に配置された海水冷却系の機能が喪失する高さ（設計津波高さ＋α）以上，津波が原子力安全・保安院からの指示に基づいて対策が取られた高さ以下」の場合は，非常用 DG の停止・最終ヒートシンクの喪失事象。

⑵　津波の高さが，「原子力安全・保安院からの指示に基づいて設定した高さ以上」の場合は，建屋内部の直流バッテリー・建屋内循環システム等の冠水による機能喪失。

なお，⑴の場合には，津波襲来による非常用ディーゼル発電機の機能喪失時から，電源車からの電源が供給されるまでの間は，直流バッテリーが唯一の電源となっていることが明白である。また，⑵の場合でも，直流バッテリー等の防水化を施し，浸水した場合でも最低限のシステムを作動させることができれば，その後の事故の緩和につながると考えられる。

したがって，安全性の向上のためには，直流バッテリーの防水化・予備を準備するなどの多重化は当然不可欠であるが，外部電源の強化も重要な対策となる。この電源の強化策としては，例えば，原子力発電所の近くに小型ガスタービンを設置し，通常時は商用電源とし，再生エネルギーの発電量変動対応電源として用いることができればさらに利用価値があがり，非常時には直接，原子力発電所に電力を供給すると同時に，余った電力は立地地域の重要拠点に供給し，最低限の情報提供や医療サービスの提供が可能とするなどして，地域一帯の安全性向上に資することもできる。以上のようなことを踏まえると，津波に対するストレステストに対して，本ガイドラインによる評価は簡易的な方法となっているものと考えられる。



第1図　ガイドラインに基づく標準的なBWRの時間軸に沿った評価例

Ⅳ．今後の活動方針

原子力安全委員会原子力安全基準・指針専門部会第11回地震・津波関連指針等検討小委員会会議後決定資料にも記載されているように，津波に対する耐性を評価する際には，津波の高さの基準値(基準津波)を，まず決める必要性が生じるが，精度よく津波の高さを予想できるかどうかは発生源や規模を正確に予測できないことから非常に難しい。また，設定した高さよりも高い津波が来襲した場合に，福島第一原子力発電所のような事故に陥るのではないかという不安は払拭できない。さらに，津波高さの基準値までの津波に対しても100%想定通りに事態が進むとも限らない。そこで，対策として，ハードとソフトの2つの視点から考える[3)]。すなわち，安全性の確保のためには，ハードだけを強化しても場合によっては対応できなくなる可能性がゼロではなく，いつでも使用可能な機器(高台に置かれている可搬式の機器など)を用いた柔軟な対応措置を日頃から準備しておくというような対策をとる。特に，過剰なハードの強化は，経済的な負担となるばかりでなく，メンテナンスを含めたシステムの更なる複雑化を招くと同時に，安全に対する過信をもたらし(例えば，スーパー堤防に守られているという安心感からの避難の遅れなど)，かえって安全性に対しての改善の阻害にもなりえる。そこで，以下のようなプロセスを保全活動の一環として取り扱うことを提案したい。

(1)　津波の高さを設定する。
(2)　津波が襲来した場合でも放射性物質の大量放出に至らないための最小限のシステムを抽出する。
(3)　システムを機能させるためのシナリオを検討する。
(4)　ソフトによる対応では解決できない場合には，ハードの強化・新設を行う。
(5)　ソフトによる対応が可能であっても，想定した津波襲来の確率や発電所としての経済的損失/対策費用から，ハードの強化・新設を事業者が判断して実施する。
(6)　訓練等を通して,実際に対応できる体制を整える。
(7)　設定した津波の高さが，基準津波の高さを十分超えていない場合には(1)に戻る。

このようなプロセスを通して，津波対策のたゆまぬ高度化を進めるというのが，津波対策の保全の姿ではないかと考える。すなわち，ストレステストを実施するだけではなく，その結果に基づいて常に津波に対する安全性向上を目指した改善を進めることが，従来の保全活動と大きく異なる点であると思われる。さらに，シビアアクシデント(SA)対策を用意しておくだけでなく，いろいろな事象を想定し，SA 対策を活用するためのシナリオを考えると同時に，最悪の事故が発生した場合でも周辺への放射性物質の放出量を常に少なくするための努力を続けるということが，これからの原子力エネルギー利用のために求められることであると思われる。

最後に，津波対策評価ガイドラインの制定に向け，集中的な議論に積極的にご協力頂いた委員，関係機関の方々への御礼を述べるとともに，原子力発電所のさらなる安全性向上を目指し，今後も関係各位のご協力をお願いしたい。

―参 考 資 料―

1) Guideline for Assessing Large Tsunami Countermeasures in Japanese Nuclear Power Plants, Japan Society of Maintenology, December, 2011 (http : //www.jsm.or.jp/jsm/)
2) EU Stress tests specifications ; http : / / ec. europa. eu / energy / nuclear / safety / doc / 20110525_eu_stress_tests_specifications.pdf
3) 木下富雄，リスク学から見た「想定」問題，平成23年度日本設備管理学会秋期研究発表会/第 3 回検査・評価・保全に関する連携講演会，特別講演.

著 者 紹 介

橋爪秀利(はしづめ・ひでとし)
東北大学
(専門分野/関心分野)超伝導工学，電磁構造工学，熱流動工学

From Editors 編集委員会からのお知らせ

－最近の編集委員会の話題より－
(3 月 2 日第 9 回編集幹事会)

【論文誌関係】

・英文誌の Taylor&Francis 社からの発行に関して，次のことを決めた。①キーワードを確定した。②賞の新設は継続して検討する。③無料カラーページは，毎号ページ数の若い論文に１ページ分を自動的に振り分ける。④会員無料公開システムが完成し会員メールにより通知した。⑤３月号がすでにアップロードされている。⑥賛助会員／交換寄贈については送料学会負担で冊子体の発送を予定している。
・次年度編集委員の分野別の人数案を確定した。
・カテゴリー変更後の再投稿論文は，今まで通り新規論文扱いとして審査することを確認した。
・震災関連論文を含め，投稿論文審査状況について報告があった。

【学会誌関係】

・4 月号以降の 1 年間の表紙デザイン（絵と装丁）の報告があった。
・5 月号以降の記事企画について検討した。
・春の年会から「福島第一原子力発電所事故対応技術セッション（その１）」の執筆依頼をすることにした。
・「自然（再生可能）エネルギーの導入と課題」について記事企画をすることになった。
・連載講座「これからの原子力システムを担う新原子力材料」について E-Gr 主査から状況について報告があった。連載開始は 9 月号の予定。事務局から正式な執筆依頼を発信するよう指示があった。

編集委員会連絡先≪hensyu@aesj. or. jp≫

解説

福島第一原子力発電所の事故に係わる放射線影響分科会の活動報告,（Ⅱ）
緊急事態宣言下初期における放射線情報の把握と活用

「原子力安全」調査専門委員会 放射線影響分科会

「原子力安全」調査専門委員会放射線影響分科会は，放射性物質による環境汚染や水・食品汚染が問題となり，避難や退避，食物摂取制限などの措置がとられている状況下で，緊急時下の放射線防護の考え方の整理，適切な放射線情報の把握と情報の公開，防護対策を実施すべき線量基準の検討などを目的として立ち上げられた。この間，防護対策の円滑な実施に寄与するために，放射性物質の放出率，拡散状況の評価，環境中の放射性物質及び放射線情報の収集，分析，評価，緊急時下の放射線測定の課題，住民および防災関係者の被ばく管理，関連学協会との連携，情報の公開および災害対応活動に対する提言などの活動を行ってきた。本稿では，2011年10月に行われた「原子力安全」調査専門委員会国際シンポジウムでの報告を整理して述べる。

Ⅰ．はじめに

今回の福島原子力発電所の事故に伴う放射線災害では，原子力災害対策特別措置法（原災法と呼ぶ）成立以後，初めて本法令と関連する防災基本計画・原子力災害対策編や原子力施設等の防災対策について（防災指針と呼ぶ）に基づく災害対応がなされた（災害対応の全体の仕組みを本稿では防災システムと呼ぶ）。

放射線影響分科会は，災害に対する防護対策が円滑に実施されることを目的として，４月中旬に「原子力安全」調査専門委員会内に設置された。本分科会の活動は，現に進行しつつある災害の現状を踏まえて，原子力災害特別措置法制定時に示された①迅速な初期動作の確保，②国と地方公共団体との有機的な連携，③国の緊急時対応体制の強化，④原子力事業者の責務の明確化などの確実な遂行などと深くかかわり，特に，防護対策が最も重視される迅速な「初期動作の確保」の問題とは当初から密接に係わりをもって進められてきた。

今回の福島原子力発電所の事故による放射線災害は，複合災害の困難な状況下での災害対応を余儀なくするものであった。本稿ではこうした困難な状況下で放射線災害の特殊性に対処すべく，学会としての対応活動の一環として進められてきた放射線影響分科会の活動の成果と課題を概観する。

Activities of Research Group on Radiological Aspects of Emergency Countermeasures in the Nuclear Accident of Fukushima Nuclear Power Plants,（Ⅱ）：Itsumasa URABE.
（2012年　２月６日　受理）

Ⅱ．「原子力安全」調査専門委員会放射線影響分科会の設置と活動の目的

1．設置の背景

事故による放射線災害の初期対応では，防護対策を効果的に実施する観点から災害に関連する放射線情報の取得の課題が重要になる。ここでは，まず，この問題と深くかかわる緊急時モニタリングについて，原子力安全委員会の示す「環境放射線モニタリング指針」の関連事項を簡単に紹介する。

緊急時モニタリングは，緊急事態が発生した際の防護対策の立案や周辺住民への影響評価に必要な情報を得ることを目的として実施される。また，実施に際してはこれを効率的にかつ確実に実施するために２段階に分けて実施することとし，第１段階は，応急対策を立案する観点から特に迅速性を重視し，第２段階は，影響評価や復旧対策を実施する観点から，正確性を重視することを求めている。すなわち，迅速性の求められる原子力緊急事態の初期対応においては，第１段階の緊急時モニタリングである，⑴原子力施設周辺の空間線量率および周辺に放出された大気中の放射性物質（放射性希ガス，放射性ヨウ素，ウラン又はプルトニウム）の濃度の把握，⑵放射性物質の放出により影響を受けた環境試料中の放射性物質の濃度の把握，⑶適切な防護対策に資するための周辺環境における予測線量の迅速な推定，を最優先，最重要な課題としている。

しかし，今回の事故・災害では，⑴緊急時モニタリング体制の確立に時間を要し，⑵放出源情報が得られない

ことからSPEEDI情報が活用されない，⑶避難，屋内退避の防護対策の実施とモニタリング情報の関連性が不明確である，⑷モニタリング情報は点と線に限られ系統的な(項目，地域，時間間隔等)把握ができていない，⑸線量ではなく線量率の，放射能摂取量ではなく濃度の情報に振り回されたことなど，特に放射線情報の把握に関して計画的に実施されたとは考えにくい状況が相当長期間続き，放射線モニタリング情報の時宜を得た開示や被ばく線量と放射線影響の関連性に関する適切な説明など災害応急対応に必要な情報が不足する困難な状況が続いた。放射線影響分科会は，こうした状況下の4月中旬に，緊急時における放射線防護の考え方の整理，あるいは適切な放射線情報の把握と情報の公開，防護対策と線量基準の検討などを目的として立ち上げられた。

2. 活動の目的

放射線影響分科会の構成部会，メンバーおよび活動の目的を**第1表**に示す。本分科会は，検討すべき問題が広範囲に及ぶ可能性があることから，保健物理・環境科学部会，放射線工学部会，社会環境部会によって構成された。分科会の活動の目的は，第1表にあるように，緊急事態宣言下にある環境および周辺住民の被ばく線量と災害対応に当たる防災関係者の被ばく線量の低減を合理的に達成することに寄与することとした。

特に，施設からの放射性物質の放出が継続するなかで可能な限り迅速に被ばく線量の低減を実現する必要から，活動の内容は，放射性物質の挙動の単なる調査に留まらず，放射線情報の把握と防護対策実施に関する提案を積極的に発信するものになることが求められた。こうした観点から，当分科会では当面取り組むべき具体的な課題として，⑴放射性物質の放出率，拡散状況の評価，⑵環境中の放射性物質及び放射線情報の収集，分析，評価，⑶緊急時下の放射線測定の課題，⑷住民および防災関係者の被ばく管理，⑸関連学協会との連携，⑹情報の公開および災害対応活動に対する提言，を以下のように整理し活動した。

第1表　日本原子力学会「原子力安全」調査専門委員会放射線影響分科会の構成

部会構成	保健物理・環境科学部会，放射線工学部会，社会環境部会
委員構成	占部(福山大)，服部(電中研)，山澤(名大)，横山(藤田保健大)，高橋(知)(京大)，百瀬(JAEA)，飯本(東大)，井口(名大)，平山(KEK)，高橋(浩)(東大)，上松(東芝)，佐波(KEK)，岩井(原技協)，諸葛(東大)，三島(大林組)，稲村(電中研)，中島(JAEA)，澤田(三菱重工)
活動目的	・環境および周辺住民と災害対応に当たる防災関係者の被ばくの低減を合理的に達成することに寄与すること ・長期的な視野から，引き続き対応すべき諸課題の検討に寄与し得る客観的な放射線学的情報を整備しておくこと ・原子力災害の特殊性を考慮し，得られた情報を分かりやすい形で国内および世界に発信すること

Ⅲ．調査の概要と教訓

1. ICRPの考え方の適用

4月上旬は大量の放射性物質の放出の危険が3月段階に比べ相当改善された時期にあたる。この時期には放射性物質による環境汚染や食品汚染が問題となり，避難や退避，食物摂取制限などの措置がとられている。こうした状況を踏まえて，当分科会では4月下旬以降を緊急時被ばく状況から現存被ばく状況への移行期と捉え，予期しない放出に備えながら災害対応に当たる際の放射線防護上の考え方としてICRPの考え方の適用を検討した。主な考え方としては，現存被ばく状況の放射線防護として，⑴最適な防護対策を決定する際の透明性の確保，⑵防護措置に対する国の責任と利害関係者の関与，⑶最適な防護措置を実施する際の線量基準(参考レベル)の適用の仕方など，また，長期被ばく状況の放射線防護として，⑴適切な防護対策を実施するためのモニタリングシステムの確立，⑵利害関係者の意思決定過程への参加，⑶防護対策の解除は対策レベルとの関連で検討することなど，この時期の防護対策の実施に関連して重要な指針を提案することができた。

2. 放射性物質の大気放出

分科会の活動としては，最初に放出源情報の検討を行った。今回の事故では，その初期において，放出源情報が得られなかったためSPEEDIシステムによる放射能影響評価の情報が活用されなかった。しかし，放射線災害の初期対応の重要性を考慮すると放出源情報のもつ意味はきわめて大きい。当分科会では，原子炉施設からの放出放射性物質の放出量を，①敷地境界および遠隔地の環境モニタリングデータと②大気拡散評価システムを用いて評価した。

この時期には政府機関においても放出源情報が公開されたが，緊急時の予測のみならず，放出源情報の把握に大気拡散の計算的手法が重要な役割を果たすことが認知された意味は大きい。それ以後，計算的手法による大気拡散の評価に基づいて，⑴防護対策の実施されている近距離(20 km圏内)への影響，⑵施設北西方向の数十km範囲への影響，⑶広域(福島県中通りや東北地方および関東地方)への影響などの推定が可能になった。また，後のわらの汚染の問題の解明にも大気拡散計算が重要な役割を果たした。

3. 面情報としての空間線量率分布の評価

効果的な防護対策を実施するためには，放出された放射性物質による被ばくの経路に沿った防護対応策を検討する必要がある。また，これまでに得られた緊急時モニタリングデータを防護対策立案の情報源として有効に役立てるためには，現在あるデータを時系列的に空間的な広がりを持って整理する必要がある。当分科会では，公表されているモニタリングデータに基づき，まず，公衆の被ばくの経路ごとの線量評価を行った。その結果，⑴主要な経路は大気中に放出された放射性物質による外部被ばくであり，⑵初期の放射性プルームによる内部被ばく評価は，現状では難しく，将来の詳細情報に基づいて実施する必要があるとの結論を得た。この結論に従い公開されている核種ごとのデータをもとに，福島県とその周辺地域の５月中旬の時点での空間線量率分布を面情報として整理した。この結果は５月の原子力学会主催の緊急シンポジウムで公開した。

空間線量率分布を面情報として把握することにより，広域の放射性物質の分布状態が明らかになり，⑴北西方向の計画的避難区域に指定されている地域で高い空間線量率が認められ，⑵福島県中通り地区で空間線量率が比較的高くなることなどが認められた。放射線情報を面情報として把握した経験は，それ以後のモニタリング計画立案の際のデータの取扱いに重要な貢献をなすものとなった。また，空間線量率分布の結果を公開するにあたっては，情報を受け取る側の団体や個人によって利害に相違の生まれることを考慮し，放射線影響に関する十分な説明とともに，防護対策の実施計画やデータの公表の仕方などについて利害関係者との十分な協議が必要なことも明らかとなった。

4. 放射性物質の海洋拡散

これまでの緊急時モニタリングでは，その第１段階においては海洋に放出された放射能の影響評価は含まれていない。今回の事故では３月21日採取の放水口での放射能が極めて高い値を示したことから海域のモニタリングが注目された。しかし，海域の影響の把握のためには災害対策本部による分析結果のほかにいくつかの研究機関の詳細な調査による情報提供が必要であった。日本原子力研究開発機構や電力中央研究所での７月段階における海域の放射性物質の挙動評価の研究から，⑴大気－海洋結合汚染物質モデルを用いた現実的な評価により海水，堆積物の放射能推定，コウナゴ高濃度現象の解明が行われ，⑵海域の分布評価には大気からの降下を考慮する必要があることが明らかにされた。また，観測結果と計算結果の比較により，⑶原子力施設よりの直接漏洩量の推定が可能であることなどが明らかとなった。これらの結果から，原子力緊急時には陸域に向かって放出された放射性物質と同様に，海域に放出された放射性物質の動態を把握できる体制を構築しておく必要があること，また海洋拡散の問題は国内の問題に留まらず国際問題に発展する可能性があり，緊急事態に放射性物質を海域に向かって放出することの国際的な取決めを検討しておく必要があることなどの課題も明らかになった。

5. 住民等の被ばく線量の評価

緊急時モニタリングでは，住民等の被ばく線量評価は第１段階ではなく第２段階のモニタリングに位置づけられている。しかし，これは第１段階に相当する期間が比較的短時間であることを想定したものである。今回の事故では，第１段階と第２段階の明確な区別を付けることが難しく，また初期の被ばくの重要性を考慮すると，むしろ，ICRP 等の提案する被ばくの状況に応じた課題の設定の方が適切である。すなわち，事故後の対応を緊急被ばく状況と現存被ばく状況に分ける考え方である。

緊急時被ばく状況での住民の被ばく線量評価では，放射線情報の把握とともに，⑴地域別放射性物質分布と住民の行動調査に基づく被災者の線量評価の実施体制，⑵初期段階の内部被ばくモニタリングの実施体制の２つの体制を確立する必要がある。また，現存被ばく状況下では，⑴参考レベル（１～20 mSv）の運用と最適化，⑵住民の被ばくに対する不安の軽減対策，⑶被災した個人は詳細な放射線情報とこれに基づく線量低減手段の情報を受けるべきであること，⑷生活環境に応じた個人モニタリング，環境モニタリングの実施，住民の安全と安心を考慮した健康調査の実施，などが被ばく線量評価とともに重要な課題となることが提案された。現状はこれらのことを適切に実施することの重要性を示している。また，住民の被ばく線量の取扱いや線量低減の目標とその実施計画について利害関係者を交えて明確にすることなどは，これからの復旧計画等で重要な役割を果たすと考えられる。

6. 緊急時放射線計測の課題

放射線計測には２つの側面からの問題がある。ひとつは緊急時に活用することを目的に開発を行ってきた航空機サーベイやロボットシステムの緊急時下における有効利用の問題であり，他方は公衆による放射線測定の問題である。

前者の緊急時モニタリングでは，①高線量率域環境放射線モニタリング，②多層構造広域放射線モニタリング，③環境放射線モニタリング共通基盤技術の整備などの課題を検討中であることが報告された。特に，JCO 事故以後に進められた高線量率域のモニタリングシステムについては，今後の活用の可能性も高く，早急に改善すべき点を検討し，実際の応用に供する必要がある。一方，多層構造広域放射線モニタリングの考え方は各種の放射線情報を有機的に結び付けようとするもので，緊急

時対応を効率的に進めるうえで重要であり，早急な開発と現場での試験的な応用が望まれる。

公衆の放射線測定については，予想以上の広がりがみられ，多くの人が測定の経験をしている状態にある。このことは公衆の放射線理解に繋がる可能性もあり重要であるが，同時に誤った放射線情報を広める危険性もある。実効線量概念の明確化とともに正確な測定を実施するための留意事項として,⑴放射線検出器の種類,単位,指示値と放射能の関係,⑵測定条件(高さ，周囲の条件(広がり)，気象条件)，⑶バックグラウンドの影響，検出器と遮蔽，測定値の変動，⑷取扱説明書，校正などについて説明し，多くの人達の関心に適切に応える活動を進めてきた。

Ⅳ．おわりに

以上見てきたように，今回の福島での原子力発電所の事故による放射線災害では，現有の防災システムの機能に加えて，特に災害の初期においては，行政と原子力や防災の専門家の一体となった対応が求められた。災害は往々にして予期しないところで生じ，想定を超えた対応が求められる。放射線影響分科会のこれまでの活動から，原子力災害に対する対応をより実効的なものにするには，今回の防災システムの運用の経験を生かし，防護対策を立案するための放射線情報の取得と活用の視点を明確にするとともに，事故や災害の不測の事態に専門的な立場からの臨機応変な対応(対応の即時性，柔軟性，創造性)が必要となること，特に防災組織の指揮命令系統に原子力防災の専門的技術を有する常設の対応組織を設置することの重要性が示唆された。

また，これからの課題として，原子炉が安定的な冷却状態に入り，放出放射性物質の量も減少した現段階では，災害対応の放射線学的側面として，

⑴被災者の居住する生活環境の放射線情報の把握
　住民の帰還を目的としたモニタリング計画
⑵線量低減化対策についてステークホルダ間の合意形成
　線量率の変動予測と除染計画の立案と合意
⑶緊急事態解除に必要な条件
　緊急事態解除と防護対策解除の相違の明確化
⑷緊急時初期対応の在り方の検討
　緊急事態に即応できる組織体制の確立,
　緊急被ばく状況下の住民被ばく線量評価の実施

などの課題が考えられる。緊急事態の解除と防護対策の解除の問題では，最適化プロセスが重要になるだけに，詳細な放射線情報と利害関係者間のコミュニケーションの在り方などの課題が今後ますます重要になると思われる。

―参 考 資 料―

1) 飯本武志，占部逸正，“福島原発事故収束に向けたバックエンド領域の論点(Ⅰ)「放射線影響分科会からの論点」”,原子力バックエンド研究,**18**〔2〕,71-74(2011).
2) 「原子力安全」調査専門委員会，“福島第一原子力発電所の事故に係わる放射線影響分科会の活動報告(Ⅰ)；放射線被ばくに係わる汚染状況に関する情報の整理と提言”，**53**〔8〕，564-568(2011).
3) 佐々木信也，“食品中の放射能濃度の簡易測定法；NaI(Tl)シンチサーベイ測定における留意点は何か？”，日本原子力学会誌，**53**〔10〕，689-692(2011).
4) 山澤弘実，平尾茂一，”福島第一原発事故の大気を介した環境影響；環境影響の全体像把握に向けた第一歩”，日本原子力学会誌，**53**〔7〕，479-483(2011).
5) 占部逸正，“福島第一原子力発電所事故時の災害初期対応の教訓；放射線情報の把握と活用に関連して”，日本原子力学会誌，**53**〔12〕，821-825(2011).

(執筆担当：占部逸正(福山大学))

解説

ヨーロッパにおける食品摂取経路を通じてのチェルノブイリ事故の影響
全身計測による放射性セシウムの人体負荷量とそれによる内部被ばく

（財）放射線影響協会　稲葉 次郎

Ⅰ．はじめに

東京電力福島第１原子力発電所での事故発生以来，すでに１年弱が経過した。事故対応も発生直後のものから様変わりし，現在は除染を中心とした復旧復興への懸命な努力がなされている。放射線被ばくに関連する領域においても，時に空間線量率の高い場所や汚染のある物品が見つかり，また内部被ばくに関連する食品についても規制値を超えるものが報告されているが，規制値越えの食品の種類の多くについてすでに経験し，規制値越えの食品の数は漸減傾向にある。しっかりとした放射能調査を継続実施する必要があるが，今後の放射線防護策等を考えるにあたって，環境や食品の汚染の今後とそれによる被ばくに関する長期的視点を持つことが求められる。

放射性物質による環境汚染に関して私たちは２度の貴重な経験を持っている。大気圏内での核兵器実験による地球規模の環境汚染とチェルノブイリ原子力発電所事故での旧ソ連とヨーロッパ諸国での環境汚染である。いずれの場合にも放射性物質の地表への沈着密度と空間線量率が測定され，動植物食品と人体内の放射性物質濃度が測定され，最終的に外部被ばくと内部被ばくによって人体が受けた線量が算定されている。これらを基礎にチェルノブイリ事故の場合には種々の防護策も講じられている。

本稿では，福島での事故による内部被ばく防護についての考察に資することを目的とし，発生以来すでに１年が経過した現在において最も重要な核種である放射性セシウムに絞って，チェルノブイリ事故により旧ソ連とヨーロッパ諸国が経験した被ばくを中心に紹介したい。なお，内部被ばく線量を推定するにあたって，食品や飲料水さらには空気中の放射性核種濃度の値が用いられる。しかし，それらの濃度は，一般的には食品なり飲料水なりの管理のために測定されており，人の被ばく線量評価のために行われているものではないことが多い。Cs-137のようなガンマ線放出核種であれば，人体そのものを対象にしてホールボディーカウンタにより測定することで最も正確な放射性核種の体内量を得ることができ，これに基づくことによって精度の高い線量評価が可能となる。実際に，多くの国において，大気圏内核実験およびチェルノブイリ事故で生成された放射性セシウムを対象にしてホールボディーカウンタによる測定が行われ，結果が報告されている。本稿では，実測された放射性セシウム体内量の報告を集め，それに基づいて被ばくの様相を探ることにする。

Ⅱ．ロシアとベラルーシでの体内Cs-137とそれによる線量

1986年に起きたチェルノブイリ原子力発電所事故では大量の放射性物質が放出された。Cs-137の総放出量は8.5 PBq と算定されており[1]，ウクライナ，ベラルーシ，ロシアにおいて放射性物質による深刻な環境汚染が引き起こされた。環境ならびに飲食物の放射性物質濃度が測定され，さらにはロシアだけでも総数100万件に及ぶホールボディーカウンタによる人体内放射性物質の測定がなされた。

ロシアではBryansk 地区のCs-137地表沈着量の平均値が110 kBq/m^{2}であるが[1]，その中を555 kBq/m^{2}以上のcontrolled area と555 kBq/m^{2}以下の non-controlled area に分けたうえで，地表へのCs-137沈着量で規格化した人体内Cs-137量（kBq/kBq･m^{-2}）が報告されている[2]。それによるとcontrolled area での規格化Cs-137の値は1987年において約0.1 kBq/kBq･m^{-2}であり，700 kBq/m^{2}の地域ではCs-137の体内量が約70 kBq 検出されていたことになる。この規格化の値は1991年には0.025 kBq/kBq･m^{-2}であり，沈着量が700 kBq/m^{2}であった地域ではCs-137の体内量が約18 kBq 検出されていたことになる。555 kBq/m^{2}以上の地域と555 kBq/m^{2}以下の地域の間に違いがみられ，規格化した値は高汚染地域の方が小

Radiological Impact of the Chernobyl Accident through Ingestion in Europe ; Ingestion Doses Determined by Whole –body Counting of Radiocesium : Jiro INABA.

（2012年　２月５日　受理）

さい。汚染食品の摂取制限などの防護策とそれへの意識の違いが出ていると思われ，興味深い。また，体内量の半減期も両地区の間に違いがみられ，controlled area で約２年であるのに対し，non-controlled area では約1.3年である。これらの体内 Cs-137による内部被ばく線量を，参考のため Cs-137による外部被ばく線量と比較すると，non-controlled area では内部被ばくの方が外部被ばくより大きく，controlled area では内部被ばくの方が小さい。ここで，内部被ばくはホールボディーカウンタによる測定値に基づくものであるが，外部被ばく線量は TLD を用いて測定した個人線量である。一般に内部被ばく線量は外部被ばくよりも急速に低下する傾向にある。なお，黒色土壌など肥沃で収量の多い場所では Cs-137の植物食品への移行率が低く，結果的に内部被ばく線量も低い。これらのことを反映して，内部被ばくではチェルノブイリ事故後70年間に受けるであろう線量の90%から95%を事故後の10年で受けるのに対して，外部被ばくでは事故後の10年で受ける線量は60%にすぎない。

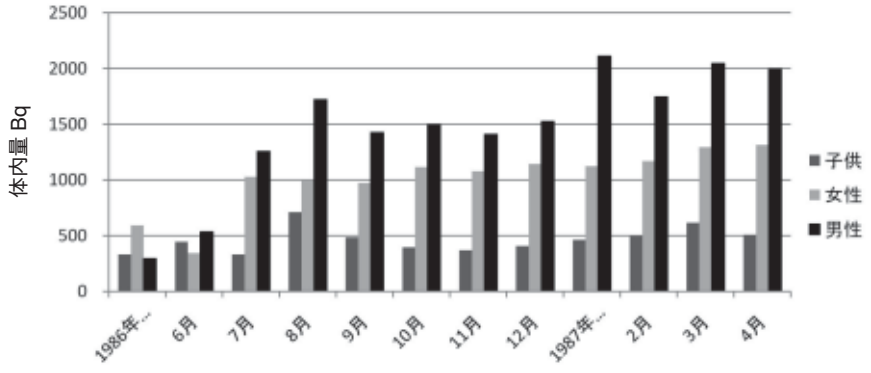
ベラルーシでは Gomel 地区の Cs-137地表沈着量の平均値が154 kBq/m²と評価されている[1]。人体内の Cs-137量は，ロシアでも同様であったが，一般に都市部で低く農村部で高いという違いが報告されている。1986年の農村部の成人3,328件の測定による Cs-137体内量は大きくばらついており，平均値は約130 kBq であった[3]。1990年まではほぼ１年の半減期で減衰し，その後はほぼ７kBq の水準を保っている。ただし，ベラルーシ放射線安全研究所 BELRAD の検査によれば，2002年から2003年においても，年間１mSv に相当する量を超える体内量(200～400 Bq/kg，ここでは体内濃度。以降，Cs-137体内量に関し原文では種々の表記法があり，そのまま使っていることに注意)を検出した児童が検査した人数の20%に達する村があると報告している[4]。旧ソ連では，事故直後に食品中放射性物質濃度に関する暫定許容レベル(TPLs)を定め，その後に被ばくの実態に合わせて許容レベルを下げる方向での改定をしている。当初の1986年には内部被ばくとして50 mSv を念頭に置いて，その後は1987年に８mSv，1991年には５mSv，さらにソ連が崩壊してロシアなど３国に分かれた後はそれぞれの国が１mSv を念頭に置いた規制値を設定している。高度汚染地域では，全員が１mSv 以下になるような規制を完全に実施するのは容易ではないのかもしれない。

Ⅲ．ドイツにおける全身計測による体内放射性セシウム量

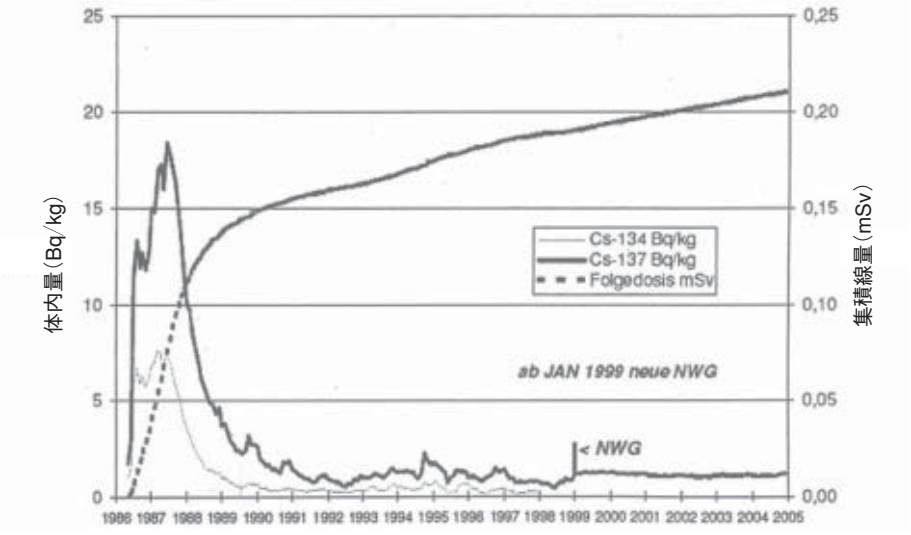
UNSCEAR[1]の評価によれば，チェルノブイリ事故で放出された放射性セシウムのドイツにおける沈着量は，平均値で2.8 kBq/m²であるが，実際にはアルプス山岳地帯で部分的に数100 kBq/m²を超す場所からほとんど検出できない場所まできわめて不均等な分布を示した。大きく分ければ，ドナウの南側であるミュンヘンを中心としたババリア地方で高く数10 kBq/m²であったのに対し，ドナウの北側は低く数 kBq/m²であった。当然，食品や飲用水にも放射性核種が検出され，アルプス山岳地帯では摂取制限等の防護策の対象になるものがあった[5]。

ミュンヘン地域の代表的住民の全身計測による体内放射性セシウム量(Cs-134と Cs-137の合計値，合計値の約65%が Cs-137の寄与)を**第１図**に示す[5]。小児が最も低く，成人女性，成人男性の順に高くなっている。なお，ドイツの中でもザール地方の Homburg ではミュンヘンの値の半分近く，またババリア地方でも山岳地帯の Voralpen ではミュンヘンの値の倍近い値が観測されている。長期的な体内量の変化とそれによる集積線量を**第２図**に示す。第２図から事故後約1.1年でピークとなり，その後は約１年弱の半減期で急激に，さらにその後は次第にゆっくりと低下している。このことは線量に反映され，集積線量に対し最初の１年間での寄与が大きく，その後は小さな寄与になっていることが分かる。

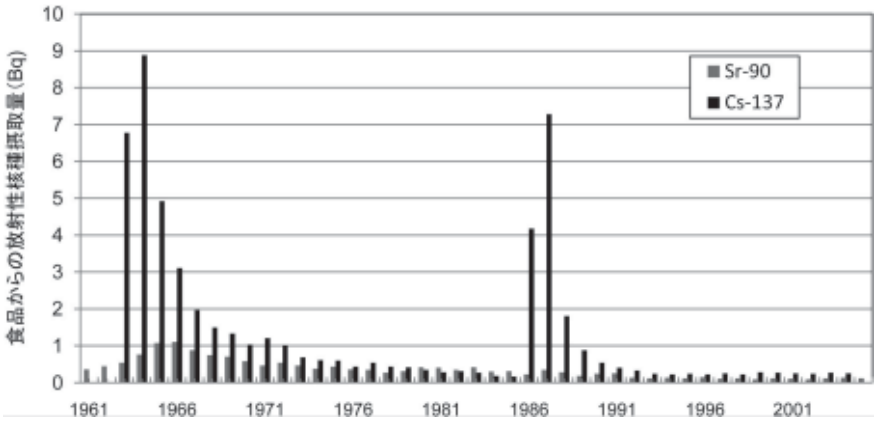
食品からの放射性核種摂取量を**第３図**に示す[6]。実際に調理された食事を収集して Sr-90と Cs-137を測定し，１日１人当たりの摂取量として求めたものであり，ドイツ国内の平均値で示している。大気圏内核実験による放射性降下物の摂取量も含まれている。報告されている個々の食品の放射能測定値と食品摂取量から，また前



第１図　ミュンヘン住民の体内 Cs-134量と Cs-137量の合計値



第 2 図　ミュンヘン住民の体内 Cs-134量と Cs-137量(体重 1 kg 当たりの Bq)およびそれらによる集積線量



第 3 図　ドイツにおける食品からの Cs-137摂取量(1 日当たり 1 人当たりの摂取量 Bq)

述の体内量から体内動態モデルを用いて計算される値とも矛盾のない値である。図から核実験降下物とチェルノブイリ事故の違いがみられる。ピーク値からの減衰はチェルノブイリ事故後で大気圏内核実験後より速やかであり，Sr-90の量は大気圏内核実験後ではチェルノブイリ事故後よりも高い。

第 1 表に Proehl による食品中の放射性核種の実測値から求めた生態学的半減期を示す[6]。生態学的半減期とは風雨等自然作用や農耕や収穫という人工作用を含めたすべての因子による圃場や作物・収穫物中の放射性物質の濃度の減少に関するパラメータである。核実験由来のものが寄与しているチェルノブイリ事故以前の生態学的半減期と，主としてチェルノブイリ事故由来の核種が寄与しているチェルノブイリ事故以降の生態学的半減期に分けてある。ただし，生態学的半減期を導いた期間には注意する必要がある。すなわち，例えばチェルノブイリ事故の場合，1986年は降下率が大きく，その直後である1987年を含む期間では比較的急激に減衰して半減期も短いが，その後の期間では半減期が次第に長くなる傾向がある。地域による違い，観察時期による違いなどに留意する必要があるが，実効的には数年で食品中の放射性核種濃度が半減しているということは見て取れ，今後の被ばく線量の見積もりにあたって重要な意味を持つ。

なお，上記は農作物あるいは畜産物としての食品中放射能についてであるが，野生の食品の中には放射性セシウムを高濃度に蓄積するもの，特にキノコ類は高いことは知られており，それらを好むイノシシ等の野生動物も放射性セシウムの濃度が高いことはよく知られている。一般に野生食品の生態学的半減期は農作物より長く，バイエルン地方のイノシシの体内放射性セシウムについては，1986年以降の生態学的半減期は10.5年と報告されている[6]。

Ⅳ．英国における人体内放射性セシウム量

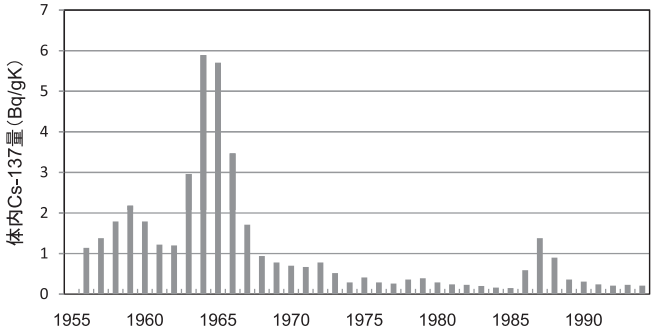
チェルノブイリ原子力発電所事故により放出された放射性物質は，1986年 5 月 2 日から 4 日にかけて英国全土に降下した[1]。Cs-137の英国全体における平均沈着量は 0.9 kBq/m^{2}であったが，スコットランド中央部，イングランドの北西部ならびにウェールズ北部では20～40 kBq/m^{2}と比較的高い沈着を示した。

第1表 食品中 Cs-137濃度の生態学的半減期

食品	生産地	期間	生態学的半減期	決定係数
ミルク	バイエルン	1969～85	4.5	90.5
		1989～99	5.9	95.3
	バーデン・ビュッテンブルグ	1969～85	3.2	86.1
		1989～99	9.1	90.6
	ニーダーザクセン	1969～85	6.1	91.5
		1989～99	5.2	83.4
	デンマーク	1967～85	6.9	
	オーストリア	1987～93	1.9	
小麦	バイエルン	1991～99	3.0	63.3
	バーデン・ビュッテンブルグ	1976～85	4.4	40.4
	ニーダーザクセン	1975～85	3.3	59.8
	ドイツ	1965～85	4.0	82.9
		1988～99	6.1	66.2
	デンマーク	1967～85	5.4	
大麦	ドイツ	1971～85	2.5	53.0
	デンマーク	1967～85	4.5	
穀物	オーストリア	1971～85	3.2	
ジャガイモ	ドイツ	1965～85	7.8	48.2
		1988～99	6.6	62.2
	オーストリア	1987～93	2.4	
野菜	オーストリア	1987～93	2.1	
牛肉	バーデン・ビュッテンブルグ	1975～85	4.1	36.7
	ドイツ	1965～85	5.4	84.7
		1988～99	6.1	65.5
豚肉	バーデン・ビュッテンブルグ	1975～85	1.8	88.0
	ドイツ	1965～85	5.2	85.2
		1988～99	3.7	79.3
日常食	ドイツ	1967～85	8.1	

英国での体内放射性セシウム量 Bq は，体内カリウム量 1 g(あるいは K-40量 Bq)との関係で表されることが多い。種々の体重の人に適用したとき，セシウム量は体重よりもカリウムの量との関連性が強いことを考慮したものである。なお，人体内には小児で体重の0.2%，成人では体重の0.18%がカリウムであり，カリウム 1 g には30.4 Bq の K-40が含まれている。

ハーウェル研究所が測定した，1950年代からのイングランド南部である Berkshire と Oxfordshire の住民の体内 Cs-137量の経時変化を**第4図**に示す[7]。なお，この地域は原子力施設から遠く，それらからの直接的寄与は小さいと考えられる場所である。チェルノブイリ事故前では，大気圏内核実験によって生成された Cs-137の体内量は測定開始当初1.2 Bq/gK(カリウム 1 g 当たり Cs-137が1.2 Bq)であったのが，1964年10月にピーク値6.4 Bq/gK となり，その後は初期には急速に，後にゆっくりと低下して1986年 4 月には0.07 Bq/gK となっている。



第4図 英国南部住民の体内 Cs-137量の経時変化(カリウム 1 g 当たりの Bq)

原子力利用を早期から進めていた英国では，特定地域において放射性セシウムによる被ばくに関する種々の経験をしている。Cumbria では1957年には Windscale 第 1 パイルで火災事故があり，1958年の 1 月から 3 月にかけ地域住民の体内放射性セシウムの上昇が見られたが，1958年末には事故前のレベルに戻っている。また，1984年に Cumbria の Seascale 住民の体内放射性セシウムを測定し，中央値が0.82 Bq/gK であり，この値はイングランド南部の住民の約 2 倍であった。スコットランドには Dounreay 核燃料施設があり，その操業の最盛期であった1963年には一般住民の Cs-137体内量の平均値が10.8 Bq/gK にまで上昇した。施設内で放射性物質に接触しない従業員の体内量は1978年に0.8 Bq/gK，1982年には0.51 Bq/gK であった。核燃料施設と関連する地域ではその地方でとれる魚をどれくらい摂取するかが体内セシウム量に大きく影響している。

チェルノブイリ事故後では，ハーウェル研究所が測定した Oxfordshire 住民の体内 Cs-137量は1987年 7 月にピークとなってその時の値は1.63 Bq/gK であり，Cs-134のそれは0.62 Bq/gK であった。この地域ではチェルノブイリ事故に起因する放射性セシウムの沈着が少なかったことを反映しており，大気圏内核実験の影響に比べれば小さいといえる。Cumbria では1986年 6 月に Cs-137全身量が約700 Bq(6.4 Bq/gK)となり，1986年 7 月以降は1987年 8 月まで約450 Bq(4.1 Bq/gK)を維持した。

スコットランドでは，1986年 5 月から1988年 2 月までの平均体内量の最大値は Cs-137で3.8 Bq/gK であり，Cs-134のそれは1.7 Bq/gK であった。最大値は事故発生の 8 ヶ月後に見られている。また，グラスゴーでは Cs-137と Cs-134の体内量はそれぞれ4.3と1.5 Bq/gK が報告されており，事故後 3 ～ 4 ヶ月でこのプラトーの値になっている。他の地域でも同様であるが，野生の狩猟動物を食べている人の体には例外的に高い放射性セシウムが検出されている。

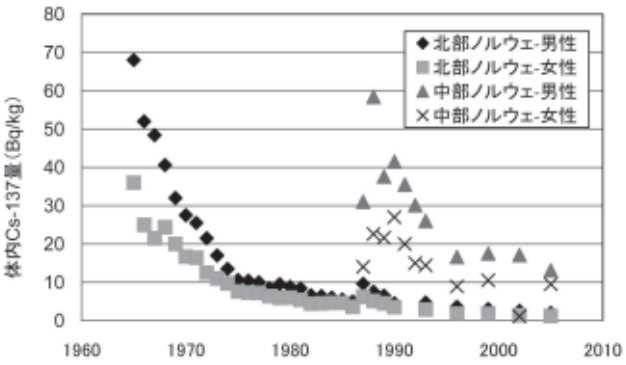
1986年には可搬型ホールボディーカウンタを用いた英国民調査が始まり，チェルノブイリ事故で放出された放射性セシウムの沈着量を反映して，体内量もスコットランド中央部，イングランドの北西部ならびにウェールズ北部において比較的高い値を観測した。これらの地方ではヒツジの肉の放射性セシウムレベルが高く，種々の防護策が取られた。

Ⅴ．北欧諸国における体内放射性セシウム量

チェルノブイリ事故によって放出された放射性物質は北欧諸国にも大きな影響を与えた。ヨーロッパ北部のノルウェー，スウェーデン，フィンランド，ロシアにまたがる地域であるラップランドには漁業やトナカイ狩猟をするサーミ人が居住しており，地衣類―トナカイ―人という亜北極圏独特の食物連鎖が成立している。

フィンランドでは国内の平均値でみると，大気圏内核実験による放射能調査を目的とした観測を始めたのは1966年であるが，それ以前の推測値を含んでCs-137の沈着量は2,500 Bq/m^{2}であり，減衰により1985年には1,800 Bq/m^{2}となっていたところ，チェルノブイリ事故により12.2 kBq/m^{2}の沈着があった。これらのCs-137によって汚染された飲食物の経口摂取経路によるフィンランド国民平均の年間線量は1964年に0.09 mSvのピークとなってその後は低下し，チェルノブイリ事故発生翌年の1987年に0.058 mSvの2度目のピークとなり，その後，急激に低下して2005年には0.01 mSvになるというパターンを示している。トナカイ飼育畜産業をしているフィンランドラップランド住民は，平均値とは異なる様相を示している。すなわち，フィンランド中部のHella地区のInari/Utsujoki行政区でのトナカイ業者の体内Cs-137量は1986年のチェルノブイリ事故以前で4.3 kBqであったのが，1987年4月には10.4 kBq，1987年9月には11.8 kBqとなり，1989年4月に10.2 kBq，1994年には4.1 kBq，2005年には1.74 kBqとなっている[8]。体内量の半減期が，男性で5.5年，女性で4.4年となっており，他の例よりも長い。これはトナカイが肥沃度が低く，地衣類の豊富な土地で飼育されており，そこでの生態学的半減期が長いことを反映しているものと考えられる。

ノルウェーでもチェルノブイリ事故の影響を受けた。Cs-137の沈着量は国全体の平均値では4.7 kBq/m^{2}であったが[1]，顕著な不均等分布を示し，最も影響を大きく受けた中部ノルウェーではCs-137沈着量が500 kBq/m^{2}以上となった[9]。なお，大気圏内核実験では北部ノルウェーで高い沈着が見られている。**第5図**にはノルウェー・ラップランドのトナカイ業者の体内Cs-137量の1965年以降の経時変化を示している[9]。北部ノルウェーでは核実験の影響を強く受けていたが，チェルノブイリ事故の影響はそれほど大きくない。中部ノルウェーでは，1986年以前のデータはないが，チェルノブイリ事故



第5図　ノルウェー・ラップランドでの体内Cs-137量の経時変化（体重1 kg当たりのBq）

の影響を強く受けている。ラップランドのサーミ集団を中心としたトナカイ業者はそれ以外のノルウェー人に比し高いCs-137体内量を持ち，結果として高い線量の被ばくをしているが，健康影響についての調査の結果，ノルウェーの北サーミ集団ではがん罹患において増加が見られず，逆にノルウェーのそれ以外の集団よりも罹患が低いことが示された。同じことがスウェーデンやフィンランドでも観察されている。

第5図で特徴的なことは，大気圏内核実験によるCs-137の沈着量が数kBq/m^{2}のときに体内量が体重1 kgあたり数百Bqとなっていたのに対し，チェルノブイリ事故ではCs-137の沈着量が100 kBq/m^{2}近くであったのに，Cs-137の体内量は核実験による体内量と大差がないことである。公的な種々の防護策が講じられ，また個人による防護意識が機能したことを反映している。それらによって体内量は10分の1になっているといわれている。

食物連鎖を介する内部被ばく防護のために先進的に防護策を講じたことでノルウェーは有名である。例えば，肉用家畜の屠畜前の清浄飼料給餌，屠畜時期の選択，家畜の生体モニタリング，家畜へのプルシアンブルーの投与等広範にわたって実行している。さらに，汚染に対し現実的に対応するため食品の介入限度についても暫定的な改定を試みている[10]。すなわち，1986年5月の時点では一般食品600 Bq/kg，ミルクおよび乳児時用食品370 Bq/kgであったのを，1986年11月にトナカイ肉と狩猟動物について，1987年6月に淡水魚に関して6,000 Bq/kgに緩和した。事故後1年間は5 mSvが許容できるとしたICRPの考えに基づくものである。1994年にはこれらの規制値は3,000 Bq/kgとされ，現在もこれが規制値として使われているが，ノルウェー政府は1,500 Bq/kgさらには600 Bq/kgにする可能性を検討している。

Ⅵ．ま と め

福島原子力発電所事故による公衆への放射線影響を考えるに資することを目的に，チェルノブイリ事故で放出されたCs-137による内部被ばくに関する情報を集め

た。できるだけ実態を明らかにするため,ホールボディーカウンタなどによる人体の実測に基づく情報に着目した。

チェルノブイリ事故で環境に放出された放射性物質,その中でもCs-137は食品として摂取され,内部被ばくを生じた。旧ソ連では高度に汚染された地域の住民に100 kBqの体内量が測定された。ヨーロッパ諸国ではドイツ南部において1 kBq強のレベルが観測されている。北欧にはラップランドを中心にトナカイ肉の摂取量が多いサーミ人がいて,その中には数10 kBqのCs-137が観測された。なお,成人では1 kBqのCs-137が体内に1年間存在し続けると,1年間に受ける線量は約0.03 mSvとなる。

体内量は1987年がピークで,その後は1年から2年の半減期で低下した。種々の防護策が働いたものと考えられている。山林などの防護策を講じにくい場所で野生食品を収集し,摂取する場合には半減期は長くなっている。

Cs-137の体内量ひいては内部被ばく線量は,旧ソ連を除けば,大気中核実験が行われた1960年代の体内量ならびに線量とほぼ同じオーダーであった。

Ⅶ. おわりに

筆者は1984年10月から1986年10月までの2年間,ウイーンのIAEA勤務を経験した。原子力安全部放射線安全課に所属し,チェルノブイリ事故発生後には種々の経験をした。この間,ウイーン市の事故に対する対応等も垣間見た。いろいろな見方があろうが,総体として市民は冷静な対応をしていたといえよう。

1986年10月下旬に帰国,放医研のホールボディーカウンタで全身計測を行った。測定の結果,約800 BqのCs-137を検出した。その後も測定を継続した結果,約80日という生物学的半減期を求めることもできた。

福島原発事故に関連して環境の放射能調査が継続されるであろうが,内部被ばくに関する心配に対応するのであれば,代表的住民に対しホールボディーカウンタによる測定を行い,生データを示すとともに線量とその意味に関ししっかりとした説明をすることが重要であると考えている。

本稿をまとめるにあたり,ドイツのAlexander Kaul, Dietmer Nosske,現在はIAEA勤務のGerhard Proehl,英国のJohn Harrison, Jane Simonds,ノルウェーのLarvans Skuterudから種々の情報を得た。ご協力に感謝いたします。

—参 考 文 献—

1) UNSCEAR, *Sources and effects of ionizing radiation, Annex D: Health effects due to radiation from the Chernobyl accident*, UNSCEAR, (2008).
2) IAEA, *Present and future environmental impact of the Chernobyl accident*, IAEA-TECDOC-1240, (2001).
3) VF Minenko, *et al*., "Individual thyroid dose estimates for a case-control study of Chernobyl-related thyroid cancer among children of Belarus—Part2. Contributions from long-lived radionuclides and external radiation", *Health Phys*., **90**, 312-327 (2006).
4) AV. Nesterenko, *et al*., "Chernobyl's radioactive contamination of food and people", *Ann. N.Y. Acad. Sci*., **1181**, 27-327 (2009).
5) SSK, *Impact of the Chernobyl Nuclear Power Plant Accident on the Federal Republic of Germany*, SSK Band 7 A, Republic of Germany, (1988).
6) SSK, 20 Jahre nach Tschernobyl, SSK Heft 50, (2006).
7) SA. Hodgson, *et al*., "A review of measurement of radionuclides in members of the public in the UK", *J. Radiol. Prot*., **24**, 369-389 (2004).
8) A-P. Leppanen, *et al*., "Effective half-lives of ^{134}Cs and ^{137}Cs in reindeer meat and in reindeer herders in Finland after the Chernobyl accident and the ensuing effective radiation doses to humans", *Health Phys*., **100**, 468-481 (2011).
9) NRPA Bulletin, 10, November, Statens stralevern (2006).
10) A. Liland, *et al*., "How long is long-term? Reflections based on over 20 years of post-Chernobyl management in Norway", *J. Environ. Radioact*., **100**, 581-584 (2009).

著 者 紹 介

稲葉次郎(いなば・じろう)
放射線影響協会
(関心分野/専門分野)放射線防護,特に公衆の内部被ばく影響と防護

解説シリーズ

福島第一原子力発電所事故後の天然ガス及び化石燃料の利用動向
第1回 化石燃料の利用動向

(財)エネルギー総合工学研究所　塙　雅一，小野崎正樹

2011年3月11日の大震災以降，原子力発電の代替として火力発電が注目されている。しかしながら，化石燃料は火力発電用以外にも多くの利用先があり，これらの動向は発電用燃料としての見通しに大きく影響する。そこで，化石燃料の状況と石油，石炭，合成液体燃料の将来動向を中心に解説する。天然ガスについては第4回に解説が予定されているので軽く触れるにとどめる。

Ⅰ．はじめに

大震災以降，原子力発電の代替として発電用に使われる石油の量は一時的に急増した。化石燃料には限りがあり，いずれはなくなるため，できる限り大切に使わなければならない。石油などの液体燃料以外への転換が難しい輸送用燃料は途上国において消費量が増え続け，価格高騰を招いているため，合成液体燃料への期待が高まってきている。そこで，大震災以降の化石燃料の状況と合成液体燃料の将来動向について概説する。

Ⅱ．石 油

化石燃料のうちで石油は採掘コストが低く，貯蔵や輸送をしやすいため，これまでエネルギーの主役であった。しかし，石油の産地は一部の地域に偏っているため，たびたび供給不安や価格高騰が起きてきた。採掘の容易な大型油田は生産量が落ち始め，採掘コストの高い深海油田や，EOR(Enhanced Oil Recovery：油田に水やスチーム等を注入する石油増進回収)による生産が増え始めている。採掘コストが高くても採算が取れるほど石油価格が高くなったことも新たな油田開発の後押しをしている。

石油はエネルギー密度が高いので，輸送用燃料に最も適している。このため，石炭や天然ガスから液体燃料を製造することも一部の国では行われているが，製造コストが高いので，特別な事情のある国に留まっている。

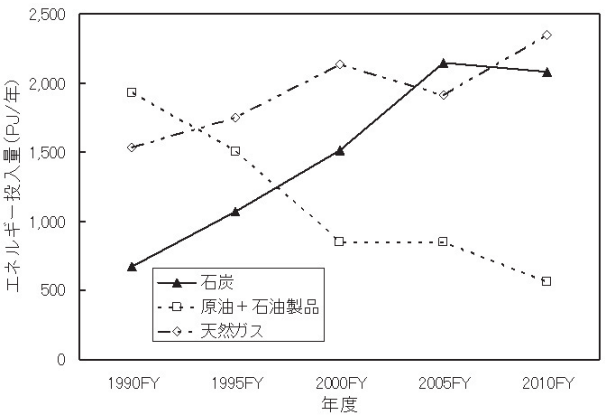
1．わが国の石油消費

(1) 電力向け石油消費

第1次石油ショック直前のわが国のエネルギーは7割以上を石油に依存していた。石油ショック以降，国をあげて石油代替エネルギーへの転換が行われた。特に，電力については石油に過度に依存しないベストミックスの政策が採られた。この間の状況を資源エネルギー庁のホームページに記載されているエネルギーバランス表[1]をもとに見てみることとする。

第1図に示すように，電力向けエネルギーが石炭と天然ガスに移っていった結果，石油依存度が大きく下がった。図には示していないが，2010年度の電力向け石油消費量は大震災後の3月，1ヵ月だけの影響で，前年度の493 PJ(ペタジュール：熱量単位)/年より70 PJ増え，563 PJ/年と，年率にして14%も増え，緊急時に有効であった。

石油火力の設備構成比は18%と石炭火力より大きく，ピーク電力を削減し，ピーク対応用の石油火力を動かす



第1図　わが国の電力向け化石燃料の使用量(FY：わが国の会計年度)(資源エネルギー庁エネバラより作成[1])

Global Utilization Trends of Natural Gas and Fossil Fuels after Fukushima Dai-ichi Nuclear Accidents(1)；*Vision of Fossil Fuel*：Masakazu HANAWA, Masaki ONOZAKI.
(2012年　2月15日　受理)

ことで電力不足をかなり補うことができる。ただし，わが国では，石炭やLNGに比較して発熱量当たりの石油価格が高いので，できるだけ石油火力を動かさないようにしており，2005年の設備稼働率は26%であった[2]。

今回の大震災のために，2011年度の電力向け石油消費量は2～3倍程度まで増えると予想される。石油価格は石炭やLNGに比較してより高価であり，依然として，ピーク対応用に使われるため，設備稼働率が石炭やLNGのように高くなることはないであろう。

なお，電力向け石油消費量の1/3は原油で，2/3は重油であり，国内製油所の精製能力に余力があるので，量的には十分対応可能と考えられる。

（2） 民生部門での石油消費

2010年度の民生部門での石油消費量は1,363 PJと電力向けの2倍強で，民生用エネルギーの29%弱を占める。民生用灯油の税金は政策的に低く抑えられてきたため，原油価格が高騰すれば原油価格に直接リンクして灯油は高くなる。このため，北海道，東北の寒冷地以外では灯油の需要が減少し，その分，電力や都市ガスの需要が増えつつある。

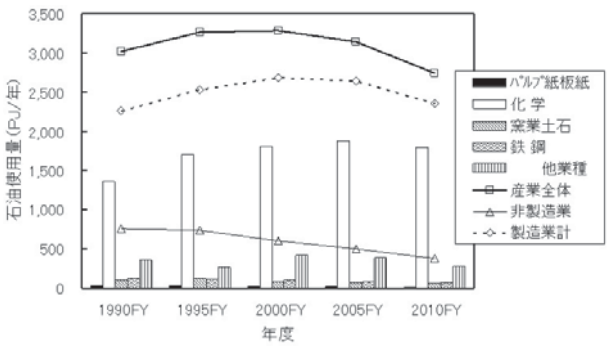
（3） 産業部門石油消費

2010年度の産業用石油消費量は2,740 PJと電力向けの2倍強で，産業用エネルギーの44%強を占める。**第2図**に示すように，2000年以降の景気低迷に伴い頭打ちになっている。

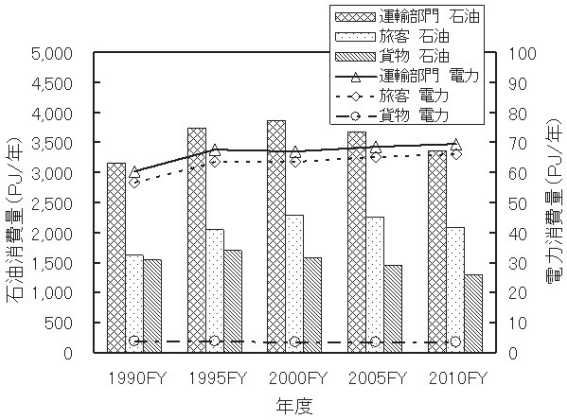
自家発用の燃料は石油から石炭やガスに替わってきているが，事業用電力ほど急激には替わってない。燃料転換に必要な設備投資費用の負担増が転換の勢いを抑えているものと思われる。

（4） 輸送用石油消費

輸送用エネルギーに至っては大部分が石油で，わずか6%弱がLPG，電力ほかとなっている。モーダルシフトの掛け声は高くても，輸送用電力の伸びはわずかで，輸送用燃料の95%以上が石油製品となっている。2000年以降，運転人口や自動車登録台数の頭打ちに応じて，乗用車用の石油消費量も頭打ちになっている。景気低迷もあって，貨物自動車用の石油消費量の落ち込みがやや多い。



第2図 わが国の産業部門の石油消費量



第3図 わが国の運輸部門エネルギー投入量

わが国の輸送用石油消費量はここ20年間，3,200～3,900 PJの範囲にあり，今後も燃費向上や少子高齢化あるいは電気自動車の普及に伴い少しずつ減っていくものと予想される(**第3図**)。

2. 世界の石油消費

日本と同様，OECD諸国においても石油消費量は頭打ちとなっている。近年，経済成長の速度を速めているBRICSや東南アジアの発展途上国では，人口増加と自動車の導入普及に伴い，輸送用燃料としての石油の消費量が急増している。このため，全世界的には輸送用燃料としての石油の消費量は当分の間，増え続けるものと考えられる。

3. 石油の供給と今後の見通し

ピークオイル論が一世を風靡し，原油価格もバーレル100ドル近辺からなかなか下がらない。石油価格の高止まりは，超深度海底油田や非在来型原油の開発を促進し，可採埋蔵量は増え続けている。ただし，輸送用燃料として石油に代わる燃料は市民権を得るには至っていない。

一方で，発展途上国での輸送用燃料としての石油の消費量は増え続け，石油代替エネルギーに代替可能な電力や産業用の石油消費量は減り続けるであろう。

石油製品の需要の中心は軽油より軽い留分に移り，重質油分解設備が不足する間は，軽質原油を主に利用することになる。世界的に重油は余り気味になる。

わが国の電力不足に対して，余り気味の重油を利用できるものの，その他の化石燃料に比べ価格が高いため，ピーク用の限られた用途になると思われる。

Ⅲ. 石 炭

石油価格の高騰を受けて，石油代替エネルギーの中心として石炭利用量が増え続けてきた。しかしながら，CO_2排出負荷が高いため，地球温暖化対策のため効率を高くして石炭使用量を減らす試みが広く行われている。

可採埋蔵量が多く，供給余力があり，価格も安定していた石炭も，昨年は豪州の洪水の影響で一時的に価格が高止まりした。とはいえ，石炭はまだまだ最も安価なエネルギー源であり今後も使用量は増え続けるであろう。

1．わが国の石炭消費

第１図に示したように，電力向け燃料はこの20年で石油から石炭に大きく変った。その主因は石炭の値段が安かったためである。この４，５年，電力向け石炭利用量は頭打ちになっている。電力需要の伸びの低下に伴い，石炭火力の新設が少なくなったためである。

（１） 電力向け石炭消費

起動やロード変更に時間がかかる石炭火力はベース電源として使われるため，設備容量の割に石炭使用量が多く，稼働率は77%程度と高い[2)]。短期的な電力不足に対して，これ以上石炭火力の稼働率を高めるのは難しい。

（２） 産業用石炭消費

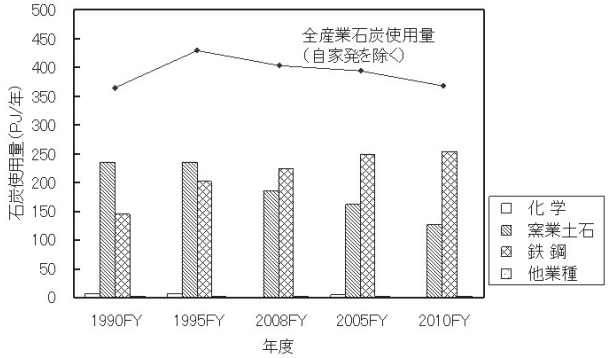
第４図に示すように，鉄鋼やセメント産業では石炭の利用が進んだものの，化学や紙パルプ産業では限定的である。すでに石炭を大量に使用していた鉄鋼やセメント産業以外では，燃料転換のための設備コストの負担が大きいためと推測される。

セメント産業における石炭使用量の減少は，わが国のセメント生産量が少なくなったことと，廃棄物の利用や省エネルギーによりセメントキルンへの微粉炭吹込みが減ったためである。

わが国の産業全体での石炭使用量は自家発ボイラ用を加えても1,000 PJ 程度で，わずかに減少傾向にある。今後も，大幅に増加する可能性は小さい。

2．世界の石炭消費と今後の見通し

石油と同様，中国やインドの石炭使用量は大幅に増えている。中国やインドでは電力，鉄鋼のみならず，メタノール等の化学原料向けにも石炭が多く使われている。IEA（International Energy Agency：国際エネルギー機関）の報告では，このままの勢いで行けば，石炭増加量の50%以上が中国とインドとなる。今後はわが国の高効率発電技術を輸出するなどの対策により，中国やインドの石炭使用を減らす必要がある。



第４図　わが国の産業部門の石炭消費量

Ⅳ．天然ガス

天然ガスは CO_2 排出負荷も低く，コンバインドサイクル発電により高効率で発電できるため，急速に使用量が増えている。ガスタービン発電は着工から運転開始までの期間が短いため，電力不足への対応に使われる。電力自由化によって引き起こされたカリフォルニアの電力危機の際にも，多くのガスタービン発電所が建設された。これにより天然ガスの需要が急増し，米国内の天然ガスは15ドル/百万 BTU 以上まで急激に値上がりし，その後やや落ち着き，７ドル/百万 BTU 程度で推移していた。近年，シェールガスを含めた新規ガス田の開発が進み，米国内の天然ガスの価格は４ドル/百万 BTU 程度まで下った。これにより，米国の LNG 輸入量が予測より少なくなり，世界的に LNG を取り合う動きが少しは収まるものと考えられる。将来，米国が LNG を輸出する可能性も出てきた。シェールガスの生産には地下水の汚染の影響を心配する動きもあり，開発が順調に進むかについては不安定要素もある。

1．わが国の天然ガス消費

（１） 電力向け天然ガス消費

わが国の電力向け天然ガスはミドル電源向けに使われているが，高効率なコンバインドサイクル発電はベース電源にも使われる。

第１図に示したように，電力向け天然ガス消費量は，ここ20年着実に伸び続けている。発電効率を考慮に入れた天然ガスの価格が石炭より安くなれば，ベース電源に使う天然ガス量が増える。逆に天然ガス価格が高くなれば，天然ガス消費量は少なくなる。

長期契約の LNG 価格は石油価格にリンクしているため，今後とも高止まりすると思われ，ベース電源向け天然ガスが大幅に増加することはないであろう。

（２） 民生用天然ガス消費

民生用天然ガスは大部分都市ガスとして供給されている。この20年で家庭用は横ばいであるのに対して，業務用は４倍に伸び800 PJ に達している。

（３） 産業用天然ガス消費

産業用ガス消費量は石油の５～10%，石炭の10～20%程度と少ない。産業用の都市ガス消費量は少しずつ増えているが，その比率は小さい。わが国ではパイプライン網がなく，LNG 基地等のインフラ整備が必要なため産業用天然ガス価格が高いためであろう。

2．世界の天然ガス消費と今後の見通し

欧州では天然ガスパイプライン網が発達し，電力，民生のみならず，化学産業向けにも天然ガスが比較的多く

使われている。ロシアからの天然ガスパイプランが増強され，供給が安定化すれば，天然ガス消費はさらに増大することも考えられる。

米国では前述のように，シェールガスの増加に伴いエネルギー利用のみならず，同伴する軽質炭化水素の化学原料向け利用も大幅に増加するであろう。

Ⅴ．合成液体燃料

輸送用燃料としては，エネルギー密度が高く使用しやすい液体燃料に代わるものは考えにくい。石油価格の高騰に伴い，多少コストがかかっても合成液体燃料を利用しようとする努力が広く行われている。その結果，いくつかの新しい技術が実用化レベルに達し，商用化された。

ただし現状では，合成液体燃料を製造するためのエネルギー効率は低くコストも高くなるので，特殊な条件にある場合にのみ商用化されている。

1．合成液体燃料とは

石炭や天然ガスを改質して得られる合成ガスからフィッシャー・トロプシュ(FT)反応によって合成液体燃料が得られる。石炭の直接液化やサンドオイル等の非在来型重質原油からの合成原油も合成液体燃料である。これに加えて，合成ガスから得られるメタノールやジメチルエーテル(DME)も，広い意味での合成液体燃料と呼べる。

2．合成液体燃料の現状

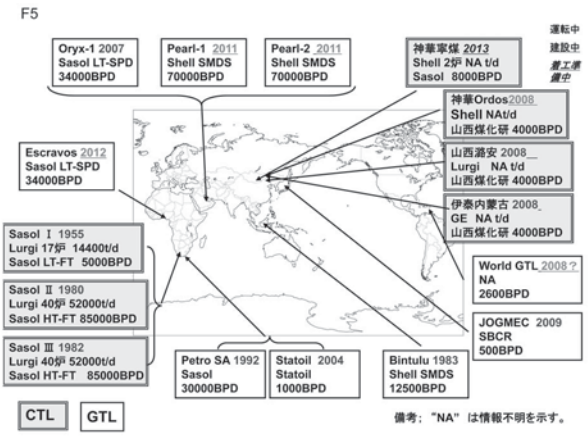
(1) FT 合成

FT 合成は CO と水素から直鎖の炭化水素を合成する反応である。FT 合成にはガソリンを主目的とする高温 FT 合成があるが，オクタン価が低く使いにくい。そのほかに，低硫黄のクリーンディーゼル油を主目的とする低温 FT 合成がある。低温 FT 合成は前段で重質油とワックスを合成してから，これを水素化分解等で軽質化して合成液体燃料とする。これによりセタン価の高いクリーンディーゼル油が得られる。現在では低温 FT 合成が主となっている。

低温 FT 合成プロセスには Sasol 社のほかに Shell, BP, ExxonMobil, ConocoPhillips, Rentech, Syntroleum, Statoil, PetroSA の各社に加え，JOGMEC(ドイツ石油天然ガス・金属鉱物資源機構)に民間会社を加えたチームでも開発，実用化が行われている。

石炭からの FT 合成油を狭い意味での CTL(Coal to Liquid)と呼ぶ。南アフリカのサソールバーグとセクンダで Sasol 社が商業運転を行っている。

中国ではいくつかの実証プラントが運転中であり，実証運転の成果をもとに商用機に移行するかどうかを決めることになっている。



第 5 図　運転もしくは建設中の FT プラント[3]

天然ガスからの FT 合成は狭い意味での GTL であり，原油価格高騰時には中東を中心に多くのプロジェクトが計画された。しかしながら，建設費の高騰もあって採算にのりがたく計画中断になったものが多い。

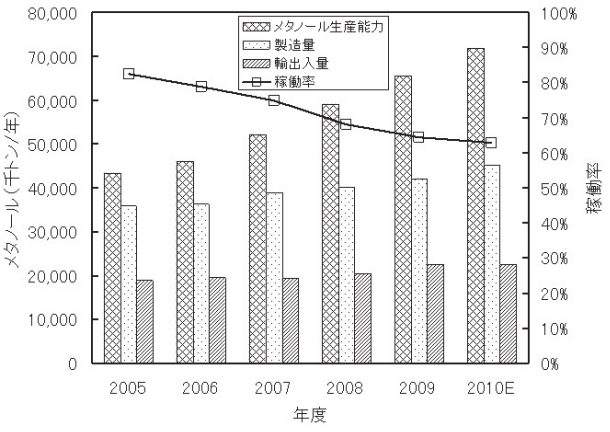
第 5 図に示すように，運転中の GTL プラントは南アフリカとカタール，マレーシアである。ナイジェリアとカタール(Pearl 2)のプラントは工事が遅れ，運転開始が2012年に延びた。

(2) メタノール，DME 合成

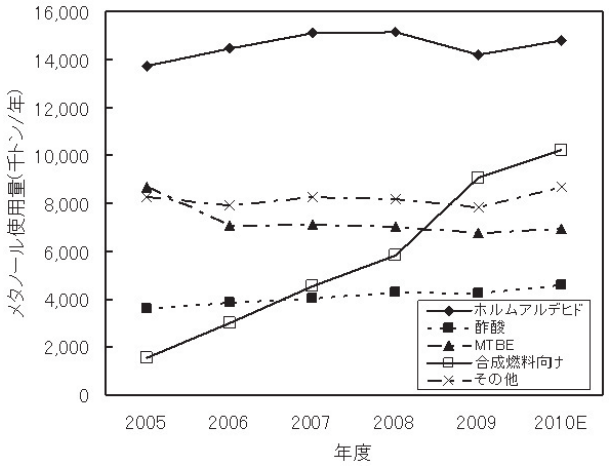
メタノールはほとんどが化学原料として使われている。世界中で生産されるメタノールは年産4,000万トンで，中国で2,000万トン，残りが産ガス国の大型プラントに生産が集約されたため，価格変動幅が大きい。

第 6，7 図は Methanol Institute[4]記載の数値を基に作図したものである。メタノールは化学原料以外に，DME や MTG(Methanol to Gasolin：メタノールから合成ガソリンを製造するプロセス)等の合成燃料向けに使われており，特に中国で大きく需要が伸びている。また，メタノールから合成される DME は年産数百万トン規模で LPG ブレンド用に利用され，今後さらに伸びると考えられている。

中国内陸部ではガソリンが不足しているので，ガソリ



第 6 図　世界のメタノールの生産能力と稼働率



第7図　世界のメタノールの用途

ンにメタノールをブレンドしたM15ガソリンが広く流通している。

かつてはニュージーランドにおいて，ExxonMobil社が1985年から10年ほどMTGプラントの商業運転を行った。1995年ごろには原油価格が比較的安定に推移した一方で，メタノール価格が高騰した。このため，メタノールプラントのみ運転継続し，MTGプラントは操業停止となった。

（3）　直接液化

わが国や米国において石炭の直接液化のパイロットプラントの運転研究が盛んに行われたが，高温高圧の反応条件であるため建設費が高く商用運転には至らなかった。ガソリンの芳香族規制等も逆風となった。

中国で直接液化の実証プラントの試運転が始まり，今後の運転状況が注目される。

3. 合成液体燃料の将来

大震災以降も世界の化石燃料の需要は拡大し，石油価格の高止まりはここしばらく続くと考えられる。原子力代替としての発電用化石燃料は石炭，天然ガスが中心となる。電力が足りなければ，高価な石油も利用せざるをえない。石炭，天然ガスを使用する発電設備が増強されれば，石油はピーク対応に使われるのみとなり，石油依存度は再び10%以下まで戻るであろう。

合成液体燃料の製造コストを上乗せしても引き合う可能性があるのは輸送用燃料以外にはそう多くはない。ボイラ燃料であれば，合成液体燃料を燃料に利用するのに比較し，石炭や天然ガスをそのまま燃料とする方が有利となる。輸送費用を考慮しても，逆転はありえないと思われる。

第3図に示したように，輸送用燃料が水素や電気へ替わるのはまだまだ長い時間がかかり，当分の間，液体燃料を輸送用に利用せざるを得ない。とすれば，南アフリカや中国内陸部のように，合成液体燃料を経済的に利用できるケースがありえる。

今後，ますます増加すると考えられるものがサルファーフリーのディーゼル油代替の合成液体燃料である。中国内陸部では，今後も，メタノールのガソリンブレンドが行われていくであろう。新たにMTGが導入される可能性も残されている。

石油価格の高止まりは今後も続き，合成液体燃料は中東における欧州向けのサルファーフリーのディーゼル油製造と，中国内陸部におけるガソリンブレンド用メタノールやMTG，あるいはLPGブレンド用のDMEが中心となって展開していくものと思われる。

Ⅵ. まとめ

大震災以降，わが国では原子力発電の代替として発電用の石油使用量は一時的に急増した。当面，LNG火力の稼働率を上げ，さらに石炭やLNG火力の新設が進めば，石油使用量は徐々に元に戻ると思われる。原子力発電と異なり，これら化石燃料を輸入するコストの増加が避けられず，早期の原子力による発電の開始が望まれる。世界的には，今後も石油の価格は高止まりし，輸送用燃料向けの合成液体燃料の利用が徐々に増えていくものと思われる。

—参 考 資 料—

1）資源エネルギー庁，エネルギーバランス表
http : //www.enecho.meti.go.jp/info/statistics/jukyu/index.htm
2）資源エネルギー庁，長期エネルギー需給見通し（再計算）
http : //www.meti.go.jp/report/data/g 90902 aj.html
3）（財）エネルギー総合工学研究所，世界における石炭からの輸送用燃料製造に関する動向調査，(NEDO)，(2008)．
4）http : //www.methanol.org/Methanol-Basics/Resources/MMSA-Global-Methanol-Supply-and-Demand.aspx

著 者 紹 介

塙　雅一（はなわ・まさかず）
エネルギー総合工学研究所
（専門分野/関心分野）反応工学/化石燃料利用システム

小野崎正樹（おのざき・まさき）
エネルギー総合工学研究所
（専門分野/関心分野）エネルギー工学/化石燃料利用システム

視角 Angle

このコーナーは，原子力への思いやそれを取り巻く状況についてさまざまな方に，個人としての意見を自由につづっていただいたものです。

理想と現実の調和

日本原子力研究開発機構，本会副会長　野村 茂雄

昨年３月11日東電福島第一原子力発電所の未曾有の大事故がおき，我が国の原子力を取り巻く環境は180度様変わりした。エネルギー・原子力政策の見直しが進んでいるが，食品や建築資材の放射能汚染などで身の回りの漠然とした不安は解消していない。オフサイトでの環境回復，オンサイトでの廃炉に向けた中長期措置が始動したものの，失ったものはあまりに大きく，原子力の信頼回復の道のりは厳しい。特異な社会情勢の中で，激動の時代の国家基本戦略を拙速に策定することに，別の不安を抱くのは，私だけではないであろう。

我々原子力の専門家は，こうした事故を二度と起こさないため，大きく失墜した原子力への信頼を少しでも回復するため，さまざまな活動を通して，科学・技術的根拠のある見解を，広くステークホルダーと共有する段階にきている。原子力関係者が，最優先に取り組むべき業務である。

東日本を中心にした微量放射能の健康不安については，個々人の価値判断に依存するが，地域のボランタリーや研究機関の専門家のご努力で，一部相互理解が進んでいる。しかしその数は限られ，今後相当な市民対話が必要。さらにホットスポット的な汚染除去活動，そのための効率的な除染技術の選択と本格適用，世界標準としての食品等安全規制の在り方などにも傾注すべきであり，風評被害防止を含め，専門家の出番は多々あろう。

全国的には，既存の原子力発電所が次々と停止に追い込まれている。女川，福島第二は，重大事故を回避でき，福島第一とは差別化できるが，個々の発電所では，いわゆるストレステストなる安全評価と3.11事故を受けた大規模なハード・ソフトの安全強化対策を進めている。運転再開に向け，国の原子力政策や安全基準・規制の見直し，広域防災計画を含む地元了解など解決すべき課題は多い。再開が遅延すれば，電力需給ひっ迫のリスクは高くなり，約３割を担ってきた自前の原子力による電源を，年間３兆円分の化石燃料を海外から購入し代替することになる。巨額の国家的経済損失は既に発生している。我が国の浮沈に関わる最大の政策的判断が迫っている。

現状１％しかない新エネルギーへの過度の期待は，道を誤る。風力発電事業は，多くが赤字状態。太陽光発電も，コスト削減が必須。新エネの実力発揮まで相当の期間と国民的負担が必要だが，シェア15%程度が限界との試算もあり，基幹エネルギーにはなりえない。

原油の価格が昨今100ドル/バレルを超えても，円高の影響もあり価格高騰は回避されているが，ホルムズ海峡封鎖のリスクもある。世界的に天然資源のひっ迫が進み，需要が供給を上回るオイルピーク到来を指摘する動きは，我が国で影を潜めている。しかし世界的にエネルギー事情は確実に緊迫の度を増しており，原子力に頼らざるをえない国々は多い。原子力を推進する米，仏，露，英，中，韓，印などの国々は，3.11事故により影響を受けたものの，中長期の原子力依存の方向性は変えないとする状況。我が国も，例外ではないはず。

安全確保を大前提に基幹電源としての原子力，核燃料サイクルと中間貯蔵による使用済燃料対策とウラン資源のリサイクル利用は，それぞれの地元の了解と協力で展開してきた基本政策。軌道修正は必要としても，大きくぶれることなく課題解決に向け総力を結集すべきである。原子力の選択肢を放棄し，先の読めない大きな混乱を全国的に招く事態は避けるべきである。理想と現実を調和させたエネルギーベストミックスを求める。

我が国は第３世代プラスの軽水炉の設計・建設，第４世代炉の開発で世界を牽引し，多くの専門家を輩出している。3.11事故を教訓にした安全強化策は，国際公共財として海外の原子炉プラントにも確実に適用すべきもの。我が国はこうした観点からも，今後も原子力を推進する国際的責務がある。

（2012年２月７日 記）

視角 Angle

我が国の実情に即した今後の電源の選択を

（財）エネルギー総合工学研究所　岡田 英俊

2011年３月11日の福島第一原子力発電所の事故発生以来１年近く経過したが（原稿執筆時），いまだ10万人を越える方々が避難生活を余儀なくされていることに忸怩たる思いを禁じ得ない。原子力発電所の事故，とりわけ原子力施設外への放射性物質の規制値を大きく上回る放出を伴う事故は，原子力発電所の所有者として決して起こしてはならぬことである。このような事態に至らしめたことには，原子力関係者の一人として無念であると申し上げざるを得ない。

現時点での事故に対する短期的な課題は，溶融・移行した燃料への安定した冷却の継続，使用済燃料プールに保管されている使用済燃料の安定した保管方法の確立，除染，放射性物質の規制値以上の放出の抑制である。これらは，関係者の尽力により速やかに達成されることを願っている。

一方，長期的な課題は，今後の電力エネルギー源の選択である。このような大事故を引き起こした原子力発電はもはや発電方式として採用すべきではなく，即刻全ての国内の原子力発電所を廃止すべきであるとの意見があることは不思議ではない。しかし，電力エネルギー源の選択には，我が国の実情に則して多方面から検討する必要がある。

安定した基幹電源として，コンバインドサイクルを選択することは，熱効率の面では優位となる。ただし，我が国でコンバインドサイクルを採用する場合は，燃料の調達が懸案となる。我が国に大規模な天然ガス田はなく，西欧諸国に見られるようなガスパイプラインで供給を受けることもできない。天然ガスは，我が国の場合LNGタンカーにより産出国より輸送せざるを得ない。ガスの性質上，備蓄可能量には限界があり，かつ産出国との外交関係が常に懸案となる。

現時点でも安定した基幹電源である石炭火力は，石炭の価格の安定性及び熱効率の点で優位である。かつ現時点では産出国との外交関係も当面憂慮すべき事態ではないが，地球温暖化ガスの排出が懸案となる。

これに対して原子力発電は，燃料供給の安定性及び備蓄可能量では優位となるが，事故発生の場合の影響の大きさ及び使用済み核燃料の処理が懸案事項である。

我が国の現在での安定した基幹電源は，いずれも一長一短であり，全ての面で他より優れている電源はないと言える。

福島第一原子力発電所の事故以降，自然エネルギーの積極的利用，エネルギーの地産地消の声が上がっているが，水力発電以外の自然エネルギーは現時点では安定した基幹電源としての役割を果たすことはできない。無論，太陽光発電，風力発電等を安定した基幹電源とすべく研究開発は継続すべきであるが，現時点では基幹電源となり得ないことは認識する必要がある。また，水力発電は，我が国では現状以上の更なる開発はほとんど不可能であることも今一度認識する必要がある。

もし，今後原子力発電の代替を求めるならば，現時点で安定した基幹電源として確立されている方式を選択すべきであり，現時点では確立されていない方式を選択することは不可能である。

福島第一原子力発電所の事故後，電力供給力の低下に呼応して電力エネルギーの節約が叫ばれてきた。電力エネルギーを無駄に使用することは避けねばならないが，必要な電力エネルギーを使用しないことは，節約ではないと思う。例えば，節電と称して地下鉄駅構内の案内表示が消灯された。頻繁にその場所を利用している者には案内は不要であろうが，初めてその場所を訪れる者にとっては案内は必要である。節電のため，エレベータやエスカレータが停止されたが，その被害を真っ先に受けたのは，車いすの使用者，松葉杖の使用者，及び足の強くない年配者等々，いわゆる弱者であった。

一般にある物の供給量が低下すると，富の偏在に応じて受給量も偏在する。筆者は手元に統計を持ち合わせてはいないが，装飾用ダイヤモンドは富の所有高に応じて偏在していると推定する。装飾用ダイヤモンドがなくとも生活には困らないが，電力エネルギーがない生活は不可能であり，電力エネルギーが富の所有高に応じて偏在する事態には決して至らしめてはならない。決して弱者を生活不能の状態に追いやってはならないのである。

常に安定した基幹電源を有することは，社会の安定した運営に不可欠である。現時点で今後の安定した基幹電源を選択する際，原子力発電をその選択肢から除くことは，我が国の実情に則するならば良い決断とは言えないと考える。

（2012年２月13日 記）

視角 Angle

「原子力に思うこと」

溝口　直

昭和二十年八月，私は疎開先の村の学校で新聞配達をさせられていた。七日だったと思う，配ろうとした新聞の第一面に，大きく「広島に新型爆弾，多大の被害がでた模様」という記事が目にとびこんできた。その当時の記事は，どんな被害でも「被害僅少」とでる世の中だったから，これは相当大きな被害だろうと，小学生の身にも感じられた。勿論，それは広島の原子爆弾であった。その三日後には長崎，それから一週間後には終戦を迎えた。あとで知るあの被害，あの惨状，ヒロシマ，ナガサキの原爆資料館でみる悲惨な現状は思っても身震いがする。

それは，たび重なる東京の大空襲をのがれて郷里大分に帰る途中のことだった。列車は小田原で敵の艦載機に機銃掃射を受け，それで乗客の何人かが死んだ。その後も何度か銃撃を受けながら，列車はようやく二日後の夕刻，広島駅についた。この先線路が不通ということで次の己非(こい)駅まで歩いて乗り継ぐことになった。降りた広島の光景は異様だった。川の多い町の橋は至るところで落ち，乗客の一団は大きく迂回しながら残った橋を渡らねばならなかった。道端には焼けただれた死体がごろごろと転がり，川は浮いた死体で，水面が見えなかった。あたり一面異臭がただよい，とっぷり日の暮れた焼け跡には，燐の燃える青白い光があちこちでボーッと光っていた。思えばその日は昭和二十年八月七日，広島に原爆が投下された翌日であった。

これは私が勤務先の病院で当直をしている時，一緒に当直をしていた内科の某先生よりきいた話であった。原爆の悲惨さは，これまでに何度もきいているが，この先生の淡々とした体験談に，私は，これまでのどんな話よりも切実に原爆のこわさを感じたのだった。（拙著「直さんのシネマホール」より引用）

原爆のこわさは，世界の常識だ。原爆は人類を破滅させ，地球を破壊する力を持っている。だから，ヒロシマ，ナガサキ以来，人間は原子爆弾を使っていない。なのに，なぜいまだに核兵器を作ろうとする国があるのだろう。使っては絶対にいけない兵器なら，当然，生物兵器のように戦争での使用禁止の協約を結び，世界中の原子爆弾を放棄すればよいではないか。それができないのは，原爆保有国が，廃棄もせずに新興国の核兵器の所有のみを認めないからだ。保有国もそうでない国も一律に核兵器を廃棄すれば，核兵器存在疑惑などしないですむと思うのだが……。なぜだろう，原爆保有がその国のステータスとでも思っているのだろうか。

原爆は兵器だから，使用できないが，それなら原発は平和利用だから使えるのか。原発は安全と国は口をすっぱくして言っていたのに，あのフクシマは何だろう。これで安全神話は崩れた。こんなことは想定外だったという。想定外のことなど，人類を破滅させる力を持つ原子力にあってよいものだろうか。すべからく，すべて「想定内」に収まらないものなど，絶対に使用してはならない。今回のフクシマの事故は，人災だ。想定内に収まらない原子力の使用は核戦争と同じだ。現に福島原発の周辺地域の惨状は，無残である。さらに，被曝による健康障害の心配は将来まで含めて未知数だ。これは，まさにヒロシマ，ナガサキの被爆に匹敵するといっても過言ではない。東電福島の原発事故は戦争だったのである。自然と人類の戦争だった。そして人類は負けた。原爆も使ってはならないが，原発も使ってはならない。これが今回のフクシマの教訓ではないか。東電は，原発が使えないから，火力にコストがかかって電気代を値上げするという。冗談ではない，原発神話を生み出すために国はいくらの地方交付金を使ったか，いくらの企業への助成をやってきたか。それらをひっくるめれば原発のコストが安いなどと言っていられるのか。

あらためて言う，人類は人類の危険についてすべて「想定内」のことしかしてはいけない。それからはじめて社会に適用するべきだ。社会に適用するためなら，いくら研究費を使ってもいい。政府はそのためにこそ研究を助成しなければならない。

（2012年２月５日 記）

溝口　直（みぞぐち・すなお）
1933年大分市生まれ。1958年京都府立医科大学卒。1960年京都府立医科大学産婦人科教室入局。1972年大分市にて産婦人科医院開業。